

Automação de Prensa Hidráulica de Laboratório

Fábio Jorge Mendes Portela

Dissertação de Mestrado

Orientador: Professor Francisco Jorge Teixeira de Freitas



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Ramo de Automação

setembro de 2015

Aos meus Pais e Irmão

Resumo

A atualização tecnológica de máquinas é, muitas vezes, uma solução adotada pela indústria, em detrimento da aquisição de novos equipamentos, de forma a melhorar as características de funcionamento. Os pontos fulcrais de uma atualização tecnológica são a automatização, a segurança, a eficiência energética e a comunicação. Assim, pode-se obter uma máquina significativamente renovada, com um custo bastante inferior, quando comparado com o custo de um equipamento novo, evitando os custos de desmantelamento de um equipamento aparentemente em fim de vida útil.

O trabalho desta dissertação consiste na Automação de uma Prensa Hidráulica de Laboratório, presente no laboratório de Óleo-hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O principal objetivo passa por recolocar em funcionamento a máquina, incorporando-lhe meios tecnológicos atualizados, de modo a poder servir de elemento de demonstração de novas capacidades de automação em máquinas.

Numa primeira fase do trabalho efetuou-se uma análise crítica de todos os sistemas anteriormente presentes, nomeadamente ao nível do sistema de comando e controlo, sistema elétrico, sistema hidráulico e instrumentação.

Seguidamente, efetuou-se a implementação de alterações ao nível do *hardware* de forma a garantir a atualização tecnológica dos meios de comando, segurança e interface com o utilizador.

Por fim, foi implementado um *software* de controlo industrial que permite o comando e a monitorização da máquina. Este contempla um modo de comando manual e vários modos de demonstração de funcionamento, com um grau crescente de automatização, recorrendo aos diversos meios existentes na máquina.

A automação desta máquina foi realizada com sucesso, já que a máquina se encontra completamente funcional e com grandes potencialidades para a realização de diversas aplicações tipicamente industriais, tornando-se uma mais-valia para o laboratório de Óleo-hidráulica.

Automation of a Laboratory Hydraulic Press

Abstract

Technological upgrading of machines is a solution often adopted in industry, instead of the acquisition of new equipment in order to improve its operating characteristics. The key points of a technological upgrade are automation, safety, energy efficiency and communication. Hence, it is possible to achieve a completely renewed machine, with a much lower cost compared to a new equipment while also avoiding the dismantling costs of an equipment at the end of its life.

The purpose of this work is the Automation of a Laboratory Hydraulic Press, present at the oilhydraulic laboratory of the School of Engineering at the University of Porto. The main objective is to show and demonstrate the new capabilities of automation in machines.

A critical analysis of the existing machine was performed, especially in terms of the instrumentation used, of the automation solution and the hydraulic system.

Changes were performed at hardware level, in order to ensure better control characteristics, safer operation and easier user interface.

Finally, an industrial control software was developed which allows the command and monitoring of the machine. This includes a manual control mode and various automatic operating modes for industry required functioning and demonstration purposes, with an increasing degree of automation.

The automation of this machine was successfully completed, since the machine is fully functional with high potential to execute various applications making it a valuable asset for the School's hydraulic laboratory.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Francisco Jorge Teixeira de Freitas, pelo acompanhamento, dedicação e partilha de conhecimentos e competências ao longo da presente dissertação, assim como pelas permanentes críticas e sugestões que permitiram a evolução deste trabalho.

Ao Sr. Joaquim Silva, técnico de laboratório, pela permanente disponibilidade, apoio, conhecimentos transmitidos e acima de tudo pelo importante companheirismo durante a evolução do trabalho.

Aos meus pais pelo seu grande contributo e incansável apoio nesta fase final da minha formação académica.

Ao meu irmão por todo o incentivo e apoio anímico para a conclusão do presente documento.

Aos meus colegas de laboratório Mariana Moura, Pedro Baltazar, Tiago Almeida e Vítor Veiga por todo o apoio demonstrado e por todos os bons momentos passados no Laboratório de Óleo-hidráulica.

A todos os restantes amigos e colegas do curso de Engenharia Mecânica pelo apoio e disponibilidade demonstrada.

A todos, um sincero Obrigado!

Índice de Conteúdos

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Prensa Hidráulica de Laboratório | 1 |
| 1.2 | Objetivos da Dissertação | 3 |
| 1.3 | Organização da Dissertação..... | 3 |
| 2 | Estudo Prévio da Máquina | 5 |
| 2.1 | Sistema Hidráulico | 6 |
| 2.1.1 | Circuito Hidráulico | 6 |
| 2.1.2 | Central Hidráulica..... | 7 |
| 2.1.3 | Válvulas de Comando..... | 8 |
| 2.2 | Sistema de Comando e Controlo | 9 |
| 2.2.1 | Controlador | 9 |
| 2.3 | Instrumentação..... | 10 |
| 2.4 | Sistema Elétrico | 12 |
| 2.4.1 | Quadro Elétrico - Geral | 12 |
| 2.4.2 | Quadro Elétrico - Central Hidráulica..... | 13 |
| 2.4.3 | Quadro Elétrico - Instrumentação..... | 13 |
| 2.5 | Outros Componentes | 14 |
| 3 | Proposta e Implementação de Alterações Tecnológicas | 15 |
| 3.1 | Sistema Hidráulico | 16 |
| 3.1.1 | Componentes Hidráulicos | 16 |
| 3.1.2 | Circuito Hidráulico | 19 |
| 3.1.3 | Caraterísticas Limites Funcionais..... | 20 |
| 3.2 | Fonte de Energia..... | 21 |
| 3.2.1 | Variador de Frequência | 21 |
| 3.3 | Instrumentação..... | 23 |
| 3.3.1 | Codificador Linear..... | 23 |
| 3.3.2 | Célula e Amplificador de Carga | 25 |
| 3.4 | Sistema de Comando e Controlo | 26 |
| 3.4.1 | Autómato Programável..... | 26 |
| 3.4.2 | Interface Homem/Máquina - HMI..... | 28 |
| 3.5 | Sistema Elétrico..... | 29 |
| 3.5.1 | Circuito Elétrico | 29 |
| 3.6 | Segurança..... | 32 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.6.1 | Implementação | 33 |
| 3.7 | Análise ao Equipamento Final | 35 |
| 3.7.1 | Testes e Resultados | 36 |
| 4 | <i>Software</i> de Controlo e Interface Gráfica | 39 |
| 4.1 | Estrutura da Programação do <i>Software</i> | 40 |
| 4.1.1 | Subprograma - Global | 40 |
| 4.1.2 | Subprograma - Emergência..... | 41 |
| 4.1.3 | Subprograma - Funcionamento | 41 |
| 4.2 | Desenvolvimento da Interface Gráfica do <i>Software</i> | 42 |
| 4.2.1 | Estrutura da Programação e Navegação..... | 44 |
| 4.2.2 | Configuração Geral dos Ecrãs..... | 45 |
| 4.2.3 | Emergência..... | 46 |
| 4.2.4 | Avisos..... | 47 |
| 4.3 | Modo Manual | 48 |
| 5 | Demonstrações Funcionais | 55 |
| 5.1 | Funcionamento em Malha Aberta..... | 56 |
| 5.1.1 | Movimento de Avanço com 2 velocidades | 57 |
| 5.1.2 | Movimento Pulsante | 63 |
| 5.2 | Funcionamento em Malha Fechada | 67 |
| 5.2.1 | Controlo de Movimento com perfil sinusoidal | 68 |
| 5.2.2 | Controlo de Força..... | 74 |
| 6 | Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros | 81 |
| 6.1 | Conclusões | 81 |
| 6.2 | Propostas para Trabalhos Futuros | 82 |
| | Referências | 83 |
| | ANEXO A – Listagem de Sinais | 85 |
| | ANEXO B – Esquemas Elétricos..... | 89 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Prensa hidráulica de laboratório PHC 1003..... | 2 |
| Figura 2.1 - Circuito hidráulico inicial | 6 |
| Figura 2.2 - Acumulador hidráulico - Rual | 7 |
| Figura 2.3 - Central hidráulica..... | 7 |
| Figura 2.4 - Válvula direcional proporcional de elevado desempenho - Bosch..... | 8 |
| Figura 2.5 - Carta amplificadora – Bosch | 9 |
| Figura 2.6 - Válvula limitadora de pressão proporcional - Vickers | 9 |
| Figura 2.7 - Controlador CompactRIO - National Instruments..... | 10 |
| Figura 2.8 - Parte lateral esquerda da prensa hidráulica..... | 11 |
| Figura 2.9 - Parte lateral direita da prensa hidráulica..... | 11 |
| Figura 2.10 - Quadro elétrico - Geral | 12 |
| Figura 2.11 - Quadro elétrico - Central Hidráulica | 13 |
| Figura 2.12 - Quadro elétrico - Instrumentação | 14 |
| Figura 2.13 - Alimentador de chapa pneumático - Festo | 14 |
| Figura 3.1 - Válvula direcional proporcional de elevada dinâmica - Parker..... | 16 |
| Figura 3.2 - Curvas características da válvula direcional proporcional | 17 |
| Figura 3.3 - Instalação da válvula direcional proporcional de elevada dinâmica..... | 17 |
| Figura 3.4 - Válvula limitadora de pressão proporcional - Bosch..... | 18 |
| Figura 3.5 - Instalação da válvula limitadora de pressão proporcional | 18 |
| Figura 3.6 - Instalação do acumulador hidráulico - Bosch..... | 19 |
| Figura 3.7 - Circuito hidráulico final..... | 20 |
| Figura 3.8 - Variador de frequência - Omron..... | 22 |
| Figura 3.9 - Instalação do variador de frequência | 22 |
| Figura 3.10 - Transdutor de posição magnetostrictivo - Temposonics..... | 23 |
| Figura 3.11 - Instalação do transdutor de posição magnetostrictivo | 24 |
| Figura 3.12 - Amplificador de carga - circuito elétrico implementado | 25 |
| Figura 3.13 - Autômato programável Modicon M251 - Schneider Electric | 26 |
| Figura 3.14 - Instalação do autômato e respetivos módulos | 27 |
| Figura 3.15 - HMI STU855 - Schneider Electric | 28 |
| Figura 3.16 - Instalação da HMI..... | 29 |
| Figura 3.17 - Quadro elétrico - geral após a revisão do circuito elétrico | 30 |
| Figura 3.18 - Quadro elétrico para comando externo da fonte de energia | 30 |
| Figura 3.19 - Quadro elétrico - HMI | 31 |
| Figura 3.20 - Monitorização das fontes de alimentação..... | 31 |
| Figura 3.21 - Dispositivos de segurança..... | 32 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.22 - Módulo de segurança - Schneider Eletric..... | 33 |
| Figura 3.23 - Instalação da botoneira de emergência..... | 34 |
| Figura 3.24 - Monitorização da botoneira de emergência física | 34 |
| Figura 3.25 - Prensa hidráulica após as alterações tecnológicas efetuadas..... | 35 |
| Figura 3.26 - Caraterística experimental da válvula limitadora de pressão proporcional | 36 |
| Figura 3.27 - Caraterística experimental da válvula direcional proporcional | 37 |
| Figura 3.28 - Potência consumida pelo motor elétrico..... | 38 |
| Figura 4.1 - Estrutura geral do Subprograma - Global..... | 40 |
| Figura 4.2 - Estrutura geral do Subprograma - Emergência..... | 41 |
| Figura 4.3 - Estrutura geral do Subprograma - Funcionamento..... | 42 |
| Figura 4.4 - Ecrã inicial..... | 43 |
| Figura 4.5 - Ecrã “Menu Principal”..... | 43 |
| Figura 4.6 - Ecrã “Sobre” e Ecrã “Ajuda”..... | 44 |
| Figura 4.7 - Estrutura da programação e navegação | 44 |
| Figura 4.8 - Configuração geral dos ecrãs..... | 45 |
| Figura 4.9 - Ecrã de atuação de paragem de emergência | 47 |
| Figura 4.10 - Ecrã de informação de aviso..... | 48 |
| Figura 4.11 - Ecrã de configuração do modo de comando da fonte de energia | 49 |
| Figura 4.12 - Ecrã de funcionamento do “Modo Manual - Comando Interno” | 49 |
| Figura 4.13 - Ecrã de funcionamento do “Modo Manual - Comando Externo” | 51 |
| Figura 4.14 - Ecrã de configuração da parametrização do “Modo Manual”..... | 52 |
| Figura 5.1 - Perfil de movimento da demonstração - Movimento de Avanço com 2 velocidades | 58 |
| Figura 5.2 - Ecrã de caraterização da demonstração - Movimento de Avanço com 2 velocidades | 59 |
| Figura 5.3 - Perfil de movimento da demonstração - Movimento Pulsante..... | 64 |
| Figura 5.4 - Ecrã de caraterização da demonstração - Movimento Pulsante..... | 65 |
| Figura 5.5 - Perfil de movimento da demonstração - Controlo de Movimento com perfil sinusoidal | 69 |
| Figura 5.6 - Diagrama de blocos do controlo de posição do atuador hidráulico..... | 70 |
| Figura 5.7 - Ecrã de caraterização da demonstração - Controlo de Movimento com perfil sinusoidal..... | 71 |
| Figura 5.8 - Perfil de velocidade da demonstração - Controlo de Força..... | 75 |
| Figura 5.9 - Diagrama de blocos do controlo de força de compressão do atuador | 76 |
| Figura 5.10 - Ecrã de caraterização da demonstração - Controlo de Força..... | 77 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Informações e características dos componentes da central hidráulica [2] | 8 |
| Tabela 2.2 - Informações e características de componentes relativos à instrumentação | 10 |
| Tabela 2.3 - Informações e características de componentes relativos à instrumentação (continuação) | 11 |
| Tabela 3.1 - Características limites funcionais..... | 20 |
| Tabela 3.2 - Características do transdutor de posição magnetostrictivo | 24 |
| Tabela 3.3 - Módulos do autômato e respectivas funções..... | 27 |
| Tabela 3.4 - Características da HMI..... | 28 |
| Tabela 4.1 - Botões/Ícones da interface gráfica | 46 |
| Tabela 4.2 - Painéis de Monitorização | 50 |
| Tabela 4.3 - Teste experimental - Modo Manual | 53 |
| Tabela 5.1 - Resultados - Movimento de Avanço com 2 velocidades - Teste 1 | 60 |
| Tabela 5.2 - Resultados - Movimento de Avanço com 2 velocidades - Teste 2 | 61 |
| Tabela 5.3 - Resultados - Movimento Pulsante..... | 66 |
| Tabela 5.4 - Resultados - Controlo de Movimento com perfil sinusoidal - Teste 1..... | 72 |
| Tabela 5.5 - Resultados - Controlo de Movimento com perfil sinusoidal - Teste 2..... | 73 |
| Tabela 5.6 - Resultados - Controlo de Força..... | 78 |

1 Introdução

Atualmente, a automação está presente em toda a atividade industrial produtiva, sendo as máquinas, os elementos chave para o aumento do desempenho produtivo. A necessidade de criar máquinas automatizadas assenta em exigências feitas, cada vez mais, pela indústria ao nível de flexibilidade, qualidade e produtividade, dependendo do trabalho em execução. A requalificação e renovação de máquinas para que se mantenham atualizadas, funcionais e modernas, é muitas vezes, mais sensata, em detrimento da compra de novos equipamentos. Os elementos essenciais de uma atualização tecnológica de uma máquina são a automatização, a eficiência energética, a segurança e a comunicação.

Neste contexto surge o tema do presente trabalho: Automação de Prensa Hidráulica de Laboratório. Integra-se na unidade curricular de Dissertação do curso Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, ramo de Automação, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Contou com a orientação do Professor Francisco Jorge Teixeira de Freitas e foi realizado durante o segundo semestre do ano letivo 2014/2015.

1.1 Prensa Hidráulica de Laboratório

Geralmente, uma prensa é uma máquina que tem como finalidade realizar trabalhos de conformação de materiais, nomeadamente, embutidura, corte, prensagem, cunhagem ou estampagem. Estas máquinas são utilizadas em diversas indústrias, como por exemplo, na indústria automóvel, realizando no universo industrial um volume de trabalho considerável.

As prensas de produção são, em geral, máquinas de elevada produtividade, podendo realizar ações às quais estão associadas forças muito elevadas e cadências, por vezes, igualmente elevadas.

As prensas de acionamento eletromecânico são, potencialmente, as de maior capacidade produtiva. No entanto, as prensas de acionamento hidráulico são, claramente, as de maior controlabilidade e flexibilidade funcional, daí a sua grande importância.

Normalmente, a solução de transmissão de energia de uma prensa hidráulica baseia-se num motor elétrico responsável pelo acionamento de uma bomba hidráulica. Esta fornece o

fluido que provoca o movimento do êmbolo do atuador da prensa, obrigando-o a deslocar-se num sentido ou no outro, de acordo com a posição da válvula direcional de controlo.

De um modo geral, as prensas podem classificar-se, segundo [1]:

- a natureza da energia utilizada na transmissão:
 - Prensas mecânicas;
 - Prensas hidráulicas;
- a forma da estrutura (ou corpo da prensa):
 - Prensa de arcada ou prensa de montantes;
 - Prensa de colunas;
 - Prensa de corpo em C;
- o número de correições:
 - Simples efeito;
 - Duplo efeito;
 - Triplo efeito;

O presente trabalho consiste na atualização tecnológica da solução de automação de uma pequena prensa hidráulica de laboratório, da empresa ACL, de corpo em C, projetada para executar pequenas operações de corte em chapa, representada na Figura 1.1 A sua força está limitada, por razões estruturais, a um máximo de 35 [kN].



Figura 1.1 - Prensa hidráulica de laboratório PHC 1003

Esta máquina destina-se a fins didáticos e demonstrativos das suas capacidades de trabalho, quando operada numa indústria. Está equipada com diversos meios de instrumentação, conferindo-lhe uma acrescida flexibilidade ao nível das operações que pode realizar e da informação a recolher durante o seu funcionamento, constituindo-se assim, uma mais-valia para o laboratório de Óleo-hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, onde se encontra instalada.

1.2 Objetivos da Dissertação

O presente trabalho consiste na automatização de uma prensa hidráulica de laboratório, existente no laboratório de Óleo-hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O principal objetivo passa por recolocar em funcionamento, atualizar e modernizar uma pequena prensa laboratorial, de modo a ser possível a sua utilização para demonstrações das suas capacidades funcionais. Esta renovação tecnológica teve como principais objetos de estudo:

- **Alterações tecnológicas** – modificações ao nível do *hardware* para dotar a máquina de novas capacidades de trabalho e melhoria das existentes;
- **Software de controlo** – programação de autómato, interface gráfica e todos os componentes associados para se obter uma máquina mais moderna e eficiente;
- **Eficiência energética** – análise e melhoria da gestão de energia consumida, sem prejudicar as características funcionais da máquina;
- **Segurança** – análise ao funcionamento da máquina e consequente implementação de medidas de segurança para que a máquina seja operada em segurança;

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, na qual se inclui esta primeira parte introdutória, onde se apresentam as características e especificações da máquina em estudo.

No capítulo 2 é feita uma análise detalhada e crítica da máquina, sendo descritos e caracterizados os diferentes componentes hidráulicos e elétricos que a constituem.

No capítulo 3 são apresentadas as alterações propostas e implementadas ao nível do *hardware* de forma a melhorar as características de funcionamento da máquina e dotá-la de novas capacidades através da utilização de componentes e sistemas mais modernos.

No capítulo 4 é apresentado o *software* de controlo industrial desenvolvido para a máquina que permite o seu comando e monitorização. Inclui-se ainda a apresentação da estrutura base de programação, tanto do autómato, como da interface homem/máquina, bem como a apresentação e descrição do “Modo Manual”.

No capítulo 5 são apresentadas e descritas quatro demonstrações funcionais distribuídas por dois modos de demonstração, “Funcionamento em Malha Aberta” e “Funcionamento em Malha Fechada”, de modo a demonstrar as capacidades e potencialidades da máquina.

No último capítulo, capítulo 6, são apresentadas as conclusões mais relevantes de todo o trabalho desenvolvido, assim como algumas propostas para realização futura de forma a complementar o trabalho desenvolvido.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas, seguindo-se alguns anexos com informações relevantes para o presente trabalho.

2 Estudo Prévio da Máquina

A máquina a modernizar sofreu a sua última atualização tecnológica no ano letivo 2006/2007, tendo sido nessa época considerada uma máquina moderna e na qual foi realizado um elevado investimento [2]. Com o passar dos anos, tornou-se desatualizada, sendo que os meios disponíveis foram ficando ultrapassados ao nível tecnológico.

Neste capítulo é feita uma análise pormenorizada dos recursos existentes na prensa hidráulica, de modo a se ter uma perceção do seu estado no início do presente trabalho. Assim, é feita uma caracterização dos equipamentos que constituem a máquina para, posteriormente, se apresentarem algumas propostas de alterações que permitam a renovação e requalificação da prensa, tornando-a mais eficiente e moderna.

As temáticas abordadas neste capítulo estão organizadas da seguinte forma:

- **Sistema hidráulico** – descrição e apresentação do circuito hidráulico, central hidráulica e válvulas de comando;
- **Sistema de comando e controlo** – apresentação do controlador;
- **Instrumentação** – apresentação dos diferentes sensores e transdutores disponíveis;
- **Sistema elétrico** – análise ao circuito elétrico implementado;
- **Outros componentes;**

2.1 Sistema Hidráulico

2.1.1 Circuito Hidráulico

O circuito hidráulico implementado na prensa é responsável pelo movimento alternado do atuador, encontrando-se representado na Figura 2.1.

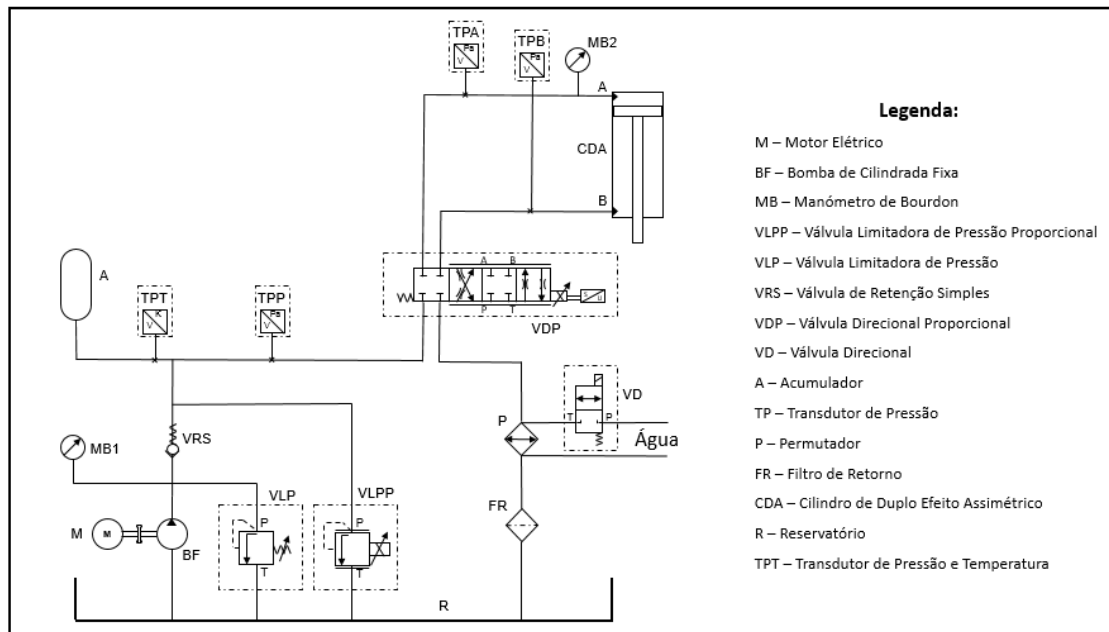


Figura 2.1 - Circuito hidráulico inicial

O circuito hidráulico é alimentado por uma bomba de cilindrada fixa (BF) acionada por um motor elétrico trifásico (M). O atuador movimenta-se num sentido ou no outro, dependendo da posição da válvula direcional proporcional (VDP). Este tem um curso de 100 [mm], 63 [mm] de diâmetro de êmbolo e 45 [mm] de diâmetro de haste.

A pressão de funcionamento é limitada por uma válvula limitadora de pressão de comando elétrico (VLPP), de acordo com as necessidades da aplicação que estiver a ser executada. Já a pressão máxima de segurança é estabelecida por uma válvula limitadora de pressão de comando manual (VLP), presente na central hidráulica.

Ao nível energético, o grupo hidráulico é composto por uma bomba de cilindrada fixa (BF) com velocidade de acionamento fixa e com pressão limite definida por uma válvula de comando elétrico (VLPP). É através deste comando que é possível realizar a gestão energética da máquina.

É ainda de salientar a presença de um acumulador hidráulico – Figura 2.2 – que oferece uma dinâmica acrescida ao sistema, conferindo-lhe uma maior flexibilidade de funcionamento. Este acumulador, de marca Rual e modelo ASA 1, possui um volume de 1 [l] e uma pressão máxima de 300 [bar].



Figura 2.2 - Acumulador hidráulico - Rual

2.1.2 Central Hidráulica

A central hidráulica – Figura 2.3 – é constituída por um motor elétrico trifásico com 7,5 [kW] de potência, com uma velocidade de rotação nominal de 1440 [rpm], para acionamento de uma bomba que, por sua vez, fornece um caudal máximo de 31 [l/min] e com uma pressão máxima de funcionamento de 150 [bar].



Figura 2.3 - Central hidráulica

Na central existe ainda um permutador de calor água/óleo e respetiva válvula de comando que permite fazer o arrefecimento do fluido de trabalho. O permutador de calor água/óleo é particularmente importante caso a eficiência energética do sistema seja reduzida.

Na tabela 2.1 apresenta-se um quadro resumo das características dos componentes da central hidráulica.

Tabela 2.1 - Informações e características dos componentes da central hidráulica [2]

| Componente | Marca / Modelo | Caraterística |
|-------------------------------|------------------------|---|
| Motor | Siemens / 1LA11334AA71 | $P = 7,5 \text{ kW}$ $n = 1440 \text{ rpm}$ |
| Bomba | Engrenagem Exterior | $C_g = 21 \text{ cm}^3$ $p_{\max} = 150 \text{ bar}$ |
| Válvula Limitadora de Pressão | Hydronorma / Rexroth | - |
| Válvula de Refrigeração | Danfoss / EVSI 10 OL | Válvula 2/2 Normalmente Fechada |

2.1.3 Válvulas de Comando

Nesta máquina as válvulas de comando aplicadas são do tipo proporcional, oferecendo, por isso, uma grande vantagem quer ao nível da controlabilidade, quer ao nível da simplificação do circuito hidráulico. Assim, são necessários menos componentes hidráulicos e dispõe-se de uma maior controlabilidade [3]. As válvulas hidráulicas proporcionais disponíveis são:

- **Válvula direcional proporcional de elevado desempenho BOSCH 0811 404 038** – válvula direcional de 4 orifícios, com caudal nominal de 24 [l/min], para $\Delta p = 35$ [bar] e pressão máxima de 315 [bar], representada na Figura 2.4 [4];



Figura 2.4 - Válvula direcional proporcional de elevado desempenho - Bosch

Para o comando desta válvula é utilizada uma carta amplificadora da Bosch, modelo 0811 405 030, representada na Figura 2.5.



Figura 2.5 - Carta amplificadora – Bosch

- **Válvula limitadora de pressão proporcional Vickers ERV1-16:** válvula indicada para o comando de pressão até 210 [bar] e caudal até 132 [l/min], representada na Figura 2.6 [5];



Figura 2.6 - Válvula limitadora de pressão proporcional - Vickers

Para o comando desta válvula a partir do autómato é utilizado o amplificador eletrónico EHH-AMP-702-D-20 da Vickers, de montagem em ficha [6].

2.2 Sistema de Comando e Controlo

2.2.1 Controlador

O controlador instalado na prensa era um CompactRIO. Trata-se de um sistema de controlo e aquisição de dados da National Instruments, em que o seu funcionamento se baseia na tecnologia *Field Programmable Gate Array* (FPGA). O CompactRIO – Figura 2.7 – possui o comportamento de um sistema de controlo em tempo real e trata-se de um controlador do tipo modular, no qual estão integrados mais módulos, como por exemplo, módulos de entradas e saídas, tanto analógicas como digitais [7].

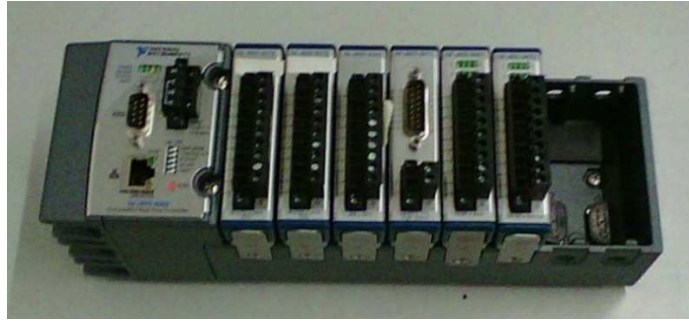


Figura 2.7 - Controlador CompactRIO - National Instruments

A interface entre este controlador e um utilizador é realizada utilizando um computador e a sua programação é feita através de um *software* específico dentro da plataforma LabVIEW.

2.3 Instrumentação

Ao nível da instrumentação, a prensa está equipada com um número significativo de elementos de instrumentação de medição. Esta quantidade e variedade deve-se ao facto de se tratar de uma máquina para fins didáticos e de estudo laboratorial, permitindo ter disponível uma máquina que se pode autoanalisar e que assim, permite identificar diversos e diferentes estados funcionais. Geralmente, na indústria estas máquinas possuem muito menos instrumentação, visto que se destinam a realizar, quase sempre, o mesmo tipo de operações, não necessitando, por isso de tanta flexibilidade.

Nas Tabelas 2.2 e 2.3 são apresentadas as principais informações e características dos componentes relativos à instrumentação e nas Figuras 2.8 e 2.9 pode-se observar a localização e disposição destes elementos na máquina.

Tabela 2.2 - Informações e características de componentes relativos à instrumentação

| Elemento | Detetores de fim de curso [8] | Codificador incremental linear (Encoder) [9] | Célula de carga [10] |
|----------------------|--|--|--|
| Quantidade | 2 | 1 | 1 |
| Referência | XS7F1A1DBL01M8 | FAGOR MOX145 | Kistler Type 9051A |
| Sinal | 1 Contacto NC | TTL diferencial | Carga elétrica |
| Gama de medição | Não se aplica | 140 mm | 0 - 120 kN |
| Resolução | Não se aplica | 1 μ m | Infinita |
| Componente associado | Atuador linear de duplo efeito assimétrico | Atuador linear de duplo efeito assimétrico | Atuador linear de duplo efeito assimétrico |
| Outros dados | Indutivo | Exatidão $\pm 5 \mu$ m | Sensibilidade - 4,3 pC/N |

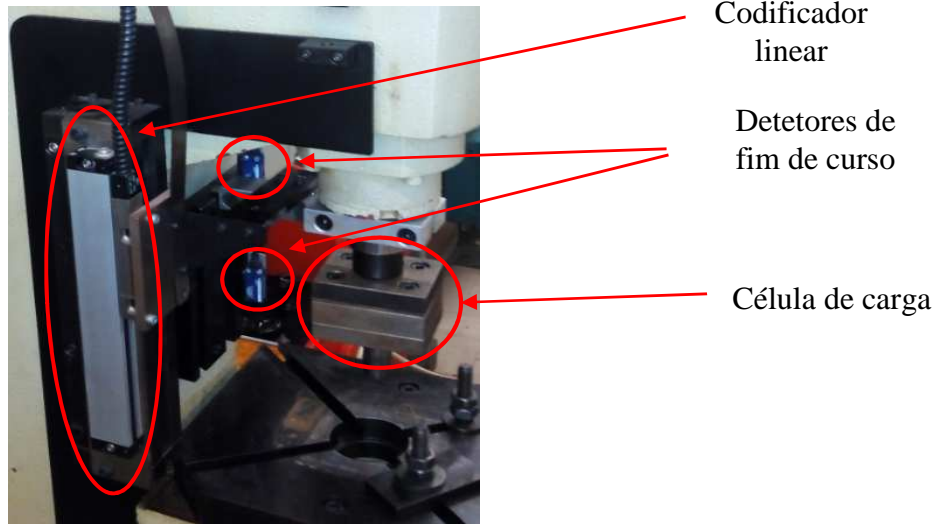


Figura 2.8 - Parte lateral esquerda da prensa hidráulica

Tabela 2.3 - Informações e características de componentes relativos à instrumentação (continuação)

| Elemento | Amplificador de carga [11] | Transdutor de pressão [12] | Transdutor de pressão e temperatura [13] |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|--|
| Quantidade | 1 | 3 | 1 |
| Referência | Kistler Type 5041 | AEP - LABTP14 | KMK – Sensortechnik type 052 |
| Sinal | $\pm 10 \text{ V}$ | $0 - 10 \text{ V}$ | $1 - 3,5 \text{ V}$ |
| Gama de medição | $\pm 99.900 \text{ pC}$ | $0 - 250 \text{ bar}$ | Pressão – $0-600 \text{ bar}$ Temperatura – $0-85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| Linearidade | $< \pm 0,1 \%$ | $< \pm 0,05 \%$ | Desconhecida |
| Componente associado | Célula de carga | Circuito Hidráulico | Circuito Hidráulico |

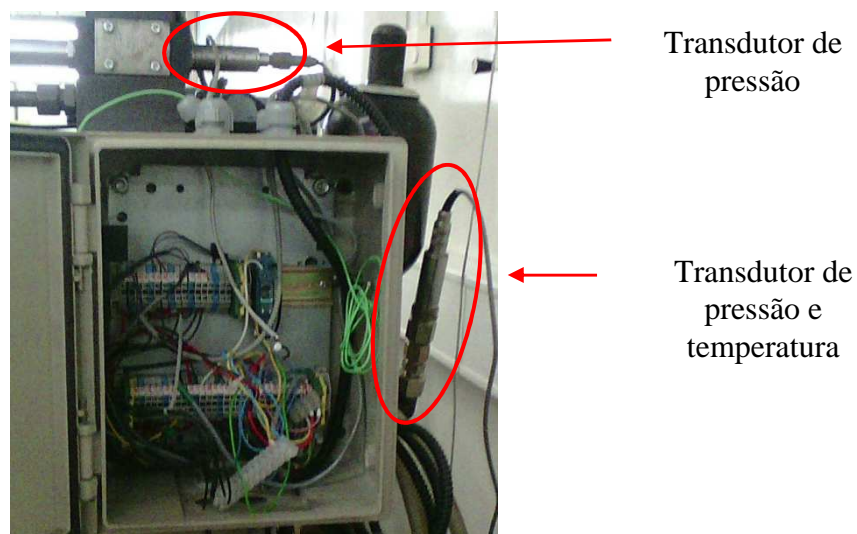


Figura 2.9 - Parte lateral direita da prensa hidráulica

2.4 Sistema Elétrico

O sistema elétrico instalado na prensa encontra-se dividido em três quadros elétricos.

2.4.1 Quadro Elétrico - Geral

Encontra-se instalado na parte inferior da prensa – Figura 2.10 – e é constituído pelos seguintes componentes:

- Controlador e respetivos módulos;
- Fontes de alimentação;
- Dispositivos de proteção e corte (disjuntores e interruptores);
- Relés de comando;
- Reguladores de tensão;
- Amplificador de controlo de válvula direcional proporcional;



Figura 2.10 - Quadro elétrico - Geral

Os componentes elétricos da prensa são alimentados a partir de duas fontes de alimentação distintas, mas ambas de 24 VDC. Utilizam-se duas fontes distintas, para se poder separar a alimentação de componentes analógicos da alimentação de componentes digitais. É de salientar que nenhuma das fontes se encontra monitorizada. Assim, neste caso tem-se:

- Fonte de Alimentação de 24 VDC – ABL7 RE2405 Schneider Electric [14] – dedicada à alimentação principal de 24 VDC de componentes digitais (detetores de fim de curso, válvulas, autômato e respetivos módulos digitais);
- Fonte de Alimentação de 24 VDC – 2222 PReletronics [15] – dedicada ao fornecimento de alimentação para os componentes analógicos (transdutor de temperatura, célula de carga, transdutores de pressão e módulos analógicos);

Como a alimentação de certos componentes não é feita a 24 VDC, utilizam-se reguladores de tensão para se obter a tensão requerida. No caso do transdutor de temperatura, utiliza-se um regulador de tensão, de referência 7812, para se obter 12 VDC e no caso do codificador linear, utiliza-se um regulador de tensão, de referência 7805, para se obter 5 VDC para a respetiva alimentação.

2.4.2 Quadro Elétrico - Central Hidráulica

Encontra-se instalado na central hidráulica – Figura 2.11 – e permite o comando do motor elétrico que aciona a bomba hidráulica. O arranque do motor é feito por circuito estrela-triângulo, sendo que, o comando é feito a 380 VAC e no qual não são utilizadas proteções no circuito elétrico. Neste quadro pode-se fazer o comando da central, seleccionar o modo manual (local) ou automático (remoto) e ainda monitorizar a pressão da bomba através de um manómetro.



Figura 2.11 - Quadro elétrico - Central Hidráulica

2.4.3 Quadro Elétrico - Instrumentação

Encontra-se instalado na parte lateral da prensa – Figura 2.12 – e concentra algumas ligações específicas referentes à instrumentação, nomeadamente, célula e amplificador de carga.



Figura 2.12 - Quadro elétrico - Instrumentação

2.5 Outros Componentes

A prensa hidráulica possui também um alimentador de chapa pneumático da marca Festo, modelo BV-100-70-C, representado na Figura 2.13.



Figura 2.13 - Alimentador de chapa pneumático - Festo

Este alimentador pneumático encontra-se completamente funcional, podendo vir a ser uma mais-valia, se assim for desejado, para complementar o trabalho de requalificação e automatização da prensa hidráulica. Este componente poderá ser útil, por exemplo, em demonstrações de corte de chapa.

3 Proposta e Implementação de Alterações Tecnológicas

Depois de finalizada a análise inicial da máquina, conclui-se que esta tem enormes potencialidades para se tornar uma máquina ainda mais funcional, eficaz e eficiente. Para tal, foram estudadas e pensadas algumas alterações de forma a aumentar ainda mais a flexibilidade desta máquina e dotá-la de novas capacidades, utilizando sistemas e componentes mais modernos. As alterações foram estruturadas nas seguintes áreas:

- **Sistema hidráulico** – Análise e substituição de componentes hidráulicos, nomeadamente para aumento da gama de velocidades de funcionamento;
- **Fonte de energia** – Instalação de um variador de frequência para controlo e comando do motor elétrico, permitindo uma maior eficiência energética;
- **Instrumentação** – Verificação da instrumentação e adição de novos componentes;
- **Sistema de comando e controlo** – Substituição do controlador e implementação de uma interface própria do tipo industrial, para evitar a necessidade de um computador;
- **Sistema elétrico** – Revisão e alteração do circuito elétrico de acordo com as novas necessidades de funcionamento e em conformidade com as alterações nos órgãos comandados;
- **Segurança** – Consideração de elementos de segurança adequados para máquinas perigosas, dadas as velocidades potencialmente atingíveis pela máquina, bem como a sua função processual;

No final deste capítulo é feita uma análise ao equipamento final.

3.1 Sistema Hidráulico

Depois de analisado o sistema hidráulico inicial, o funcionamento da máquina e atendendo a algumas das aplicações que a máquina executa e poderá vir a executar, é necessário a alteração de alguns componentes hidráulicos. Estas alterações devem-se principalmente ao facto de se pretender alargar a gama de velocidades de funcionamento do atuador hidráulico.

3.1.1 Componentes Hidráulicos

- **Válvula Direcional Proporcional**

A presença do acumulador no circuito hidráulico permite ter uma dinâmica acrescida no sistema, induzindo por vezes momentaneamente caudais elevados, que a válvula direcional instalada na máquina não suporta, limitando assim, o funcionamento da máquina. A válvula instalada permite apenas um caudal máximo de 24 [l/min] e o acumulador permitirá ter por breves instantes caudal superior a 100 [l/min].

Assim, procedeu-se à substituição da válvula em questão por uma válvula direcional proporcional de elevada dinâmica, presente no laboratório de Óleo-hidráulica. Trata-se de uma válvula 4/3 da Parker, de referência D3FPB31YC9NB03 12, de centro “fechado”, com centragem por molas, indicada para utilizações em sistemas de controlo em malha aberta, representada na Figura 3.1.

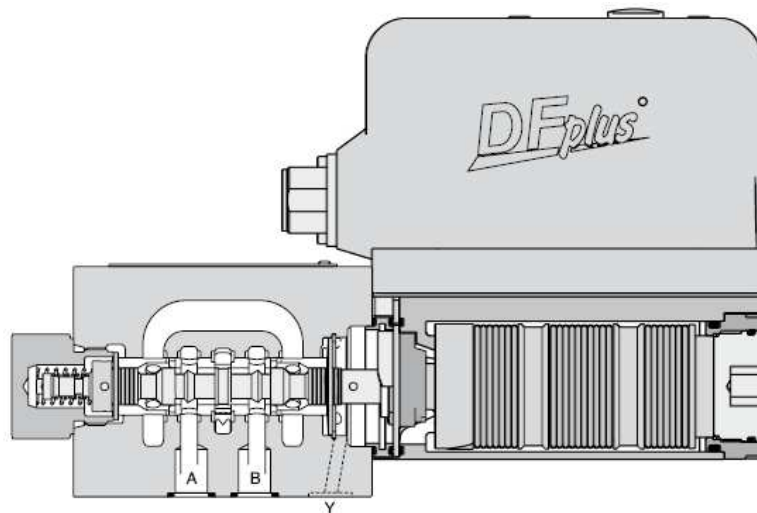


Figura 3.1 - Válvula direcional proporcional de elevada dinâmica - Parker

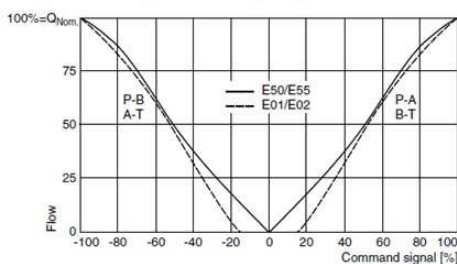
Esta válvula apresenta um recobrimento positivo na sua posição central, o que é particularmente importante para garantir a quase ausência de fuga e, portanto, a paragem do atuador em qualquer posição.

Por outro lado, esta válvula possui ganhos diferentes de caudal nas suas vias A e B, o que se reconhece como particularmente importante dado o facto de o atuador ter uma relação de áreas de, aproximadamente, 2:1. Sendo os ganhos referidos na válvula também de 2:1, tem-se assim um comando de movimento idealmente ajustado.

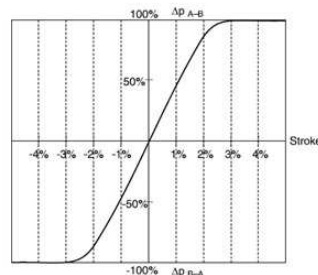
A válvula apresenta ainda um caudal nominal particularmente elevado, $Q_n=100$ [l/min] para $\Delta p=35$ [bar], pressão máxima de funcionamento de 350 [bar] e um tempo de resposta inferior a 6 [ms] [16].

Na Figura 3.2 apresentam-se as curvas características desta válvula, fornecidas pelo fabricante.

Flow curves
at $\Delta p = 35$ bar per metering edge



Pressure gain



Frequency response
 $\pm 5\%$ command signal
 $\pm 90\%$ command signal

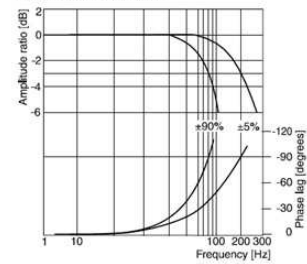


Figura 3.2 - Curvas características da válvula direcional proporcional

A válvula é para instalação em placa base e como tal foi instalada no bloco já existente representado na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Instalação da válvula direcional proporcional de elevada dinâmica

- **Válvula Limitadora de Pressão Proporcional**

Atendendo às características da válvula limitadora de pressão anteriormente referenciada, concluiu-se que esta não era indicada para a máquina. Depois de testada, verificou-se que o comando da pressão não era realizado de forma correta, existindo uma gama de baixa pressão não comandável. Este facto devia-se ao caudal para o qual a válvula era indicada ser muito superior ao caudal presente neste sistema. Como tal procedeu-se à sua substituição por uma válvula com características mais adequadas ao sistema instalado.

A válvula escolhida é da marca BOSCH, de referência DBE6-10/315G24NZ4M, indicada para o comando de pressão até 315 [bar] e caudal até 30 [l/min], também presente no laboratório de Óleo-hidráulica, representada na Figura 3.4 [17].

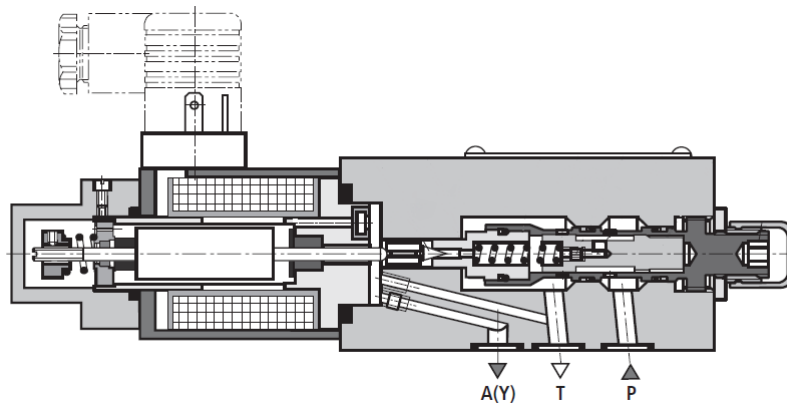


Figura 3.4 - Válvula limitadora de pressão proporcional - Bosch

A escolha desta válvula não é a ideal devido a questões de montagem e instalação, sendo que para esta aplicação em específico era necessário uma válvula para montagem em linha. No entanto, a válvula escolhida é para montagem sobre placa base e como tal, procedeu-se a uma adaptação de uma placa base em linha, como se pode observar na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Instalação da válvula limitadora de pressão proporcional

Para o comando da nova válvula a partir do autómato utiliza-se o amplificador eletrónico EHH-AMP-702-D-20 da Vickers, de montagem em ficha, utilizado no comando da válvula anteriormente instalada.

- **Acumulador Hidráulico**

O acumulador presente no circuito hidráulico não se encontrava a funcionar corretamente, tendo sido necessária a sua substituição. Como tal, procedeu-se à sua substituição por um outro de características idênticas, representado na Figura 3.6. O novo acumulador de marca Bosch possui um volume de 1 [l] e pressão máxima de 330 [bar], sendo que está ajustado para uma pressão de enchimento de aproximadamente 35 [bar].



Figura 3.6 - Instalação do acumulador hidráulico - Bosch

Para a realização do movimento do atuador hidráulico é necessário um volume total de aproximadamente 0,3 [l], sendo este valor menor que o volume útil disponível pelo acumulador de aproximadamente 0,5 [l]. Assim, conclui-se que este acumulador hidráulico possui um volume útil suficiente para realizar o movimento do atuador, sem a utilização da bomba hidráulica, sendo portanto, adequado ao sistema instalado.

3.1.2 Circuito Hidráulico

Após as alterações ao nível hidráulico, o circuito final implementado encontra-se representado na Figura 3.7.

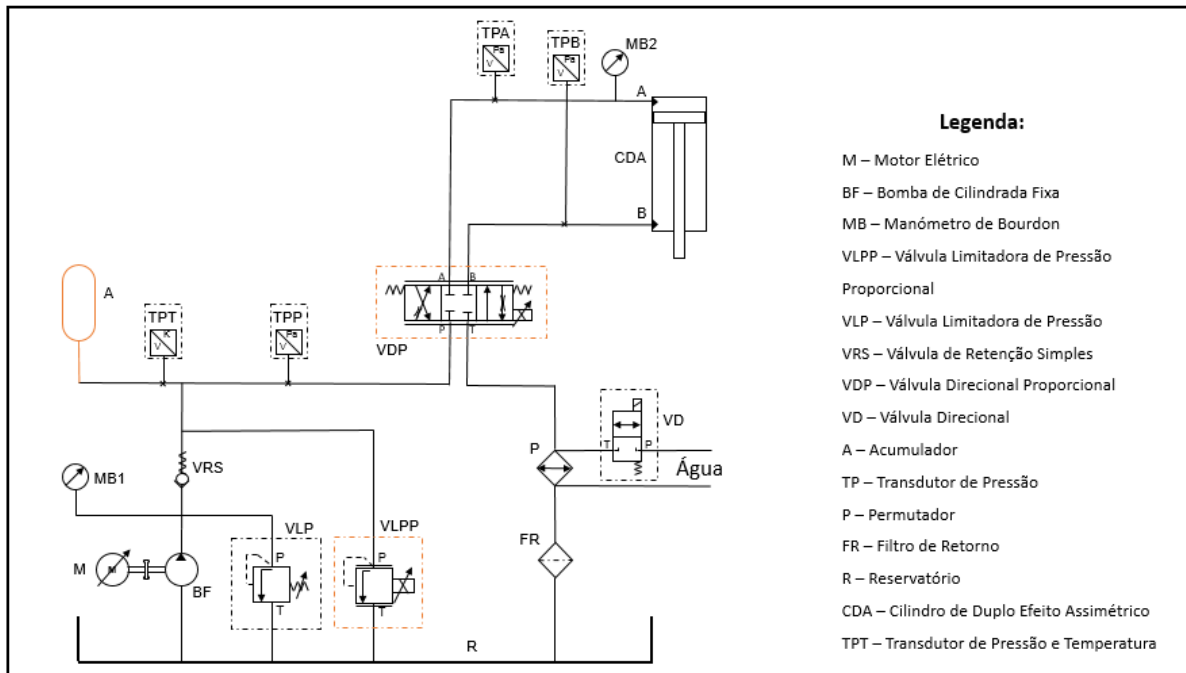


Figura 3.7 - Circuito hidráulico final

3.1.3 Caraterísticas Limites Funcionais

Em termos funcionais, a válvula limitadora de pressão presente na central foi ajustada para um valor máximo de pressão de, aproximadamente, 80 [bar]. Atendendo a este valor, ao caudal máximo debitado pela bomba, de 31 [l/min], às dimensões do atuador hidráulico e às caraterísticas da válvula direcional proporcional, obtém-se as caraterísticas máximas teóricas de funcionamento da máquina, apresentadas na Tabela 3.1 [18].

Tabela 3.1 - Caraterísticas limites funcionais

| Caraterística | Valor Máximo |
|----------------------------|--------------|
| Força | 25 kN |
| Velocidade de descida máx. | 166 mm/s |
| Velocidade de subida máx. | 169 mm/s |

No entanto, estes valores de gama de velocidade poderão ser instantaneamente mais elevados devido à presença do acumulador no circuito hidráulico que oferece uma dinâmica acrescida ao sistema.

3.2 Fonte de Energia

3.2.1 Variador de Frequência

Sendo atualmente a eficiência energética uma das grandes preocupações das indústrias, principalmente relativamente ao funcionamento das suas máquinas, foi dada uma especial atenção a esta temática, de modo a se obter uma máquina que pudesse ser mais eficiente ao nível energético, do que era inicialmente.

Como já foi referido previamente, a máquina em estudo tem como finalidade realizar quer aplicações muito simples, quer demonstrações mais complexas de algumas operações que normalmente executa na indústria. Consoante a aplicação em questão pode-se ter: aplicações quase estáticas ou aplicações de elevada dinâmica. Estes diferentes tipos de aplicações são conseguidos utilizando diferentes combinações de caudal e pressão, podendo obter-se diferentes velocidades e forças de trabalho, respetivamente, que levam a consumo de energia muito variável.

Inicialmente, a máquina já possuía elementos de comando que permitiam o ajuste contínuo do comando da pressão. Assim, pretende-se complementar esta solução com uma fonte de caudal variável.

Nesse sentido, uma das principais alterações realizadas é a inclusão de um variador de frequência. Este variador permite controlar a velocidade do motor e, por conseguinte, o caudal debitado pela bomba no circuito, constituindo assim, uma fonte de caudal variável. Assim, em aplicações quase estáticas, pode-se utilizar uma velocidade de rotação mais baixa, com um débito de caudal por parte da bomba mais baixo, levando a que o consumo de energia por parte do motor elétrico seja menor e, consequentemente, se obtenha uma solução mais económica a nível energético. Para além disto, permite também realizar acelerações e desacelerações progressivas do motor elétrico, sendo estes valores parametrizados através de variáveis internas do variador de frequência.

Utilizando esta solução composta por motor com variador de frequência, obtém-se uma solução muito mais flexível e eficiente permitindo fazer-se um ajuste do caudal para cada tipo de aplicação que a máquina estiver a executar, com um consequente aumento da eficiência energética.

O variador selecionado é da marca OMRON, tratando-se do modelo CIMR-E7Z47P5, para um motor até 7,5 KW, representado na Figura 3.8 [19]. A escolha incidiu sobre este variador, devido ao facto de este já se encontrar disponível no laboratório de óleo-hidráulica.



Figura 3.8 - Variador de frequência - Omron

A conexão ao autômato por parte do variador é feita utilizando uma ligação de comando analógico, sendo possível fazer o comando do motor elétrico e o controle da sua velocidade.

Para além de ações de comando é possível realizar diversas monitorizações, nomeadamente:

- monitorização da potência que está a ser consumida;
- monitorização da frequência de trabalho do motor elétrico;
- monitorização de avaria do variador;
- monitorização de estado de funcionamento do motor;
- monitorização de estado de funcionamento do variador;

O variador foi instalado na parte lateral inferior esquerda da prensa, como pode ser visualizado na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Instalação do variador de frequência

3.3 Instrumentação

Atendendo à inclusão de um novo autómato programável, foi necessário estudar e analisar todos os componentes relativos à instrumentação, de forma a verificar o tipo de comunicação inerente a cada um e assim, obter uma listagem de sinais para o autómato. Adicionalmente, alguns elementos mereceram especial atenção devido essencialmente às suas características de funcionamento, sendo que em alguns casos específicos foi necessária a sua substituição.

3.3.1 Codificador Linear

O codificador linear incremental da FAGOR foi um dos elementos de instrumentação que mereceu especial atenção. Trata-se de um transdutor de posição com elevada resolução. No entanto, estes transdutores do tipo incremental possuem um enorme inconveniente, dado que é necessário definir a sua posição “zero” sempre que se inicia a máquina.

Como tal, procedeu-se à substituição deste transdutor de deslocamento por uma alternativa mais conveniente, que pudesse satisfazer igualmente as necessidades de funcionamento pretendidas.

A opção recaiu sobre um transdutor de posição linear absoluto do tipo magnetoestrictivo da marca Temposonics, modelo EP, sem contacto, de referência EP00150MD341V01, representado na Figura 3.10 [20].



Figura 3.10 - Transdutor de posição magnetoestrictivo - Temposonics

Este transdutor não precisa de inicialização, após uma perda de alimentação, e possui grande durabilidade, pois o íman permanente móvel não está em contacto com o transdutor de posição, garantindo assim, ausência de desgaste. Na Tabela 3.2 apresentam-se as principais características deste transdutor.

Tabela 3.2 - Características do transdutor de posição magnetostrictivo

| | |
|--------------------------------|------------|
| Linearidade | <0,02 % |
| Repetibilidade | ±0,005 % |
| Tensão de sinal | 0 - 10 VDC |
| Curso de trabalho | 150 mm |
| Tensão de Funcionamento | 24 VDC |

Para assegurar a ligação deste transdutor ao autómato, utilizou-se um módulo de entradas analógicas de 16 bit, permitindo que a posição do atuador seja medida com uma maior resolução. Assim, obtém-se uma resolução de 2,3 [µm] face a uma resolução de 36,6 [µm] obtida com um módulo de entradas analógicas de 12 bit, como se pode observar pelas Equações 3.1 e 3.2.

$$\text{Resolução (12 bit)} = \frac{150\text{mm}}{2^{12}} = 36,621 \times 10^{-3} \text{ mm} \approx 36,6 \text{ } \mu\text{m} \quad (3.1)$$

$$\text{Resolução (16 bit)} = \frac{150\text{mm}}{2^{16}} = 2,289 \times 10^{-3} \text{ mm} \approx 2,3 \text{ } \mu\text{m} \quad (3.2)$$

Para a instalação do transdutor de posição magnetostrictivo, utilizou-se a estrutura que permitia a fixação do codificador linear da Fagor, como se pode observar na Figura 3.11.



Figura 3.11 - Instalação do transdutor de posição magnetostrictivo

3.3.2 Célula e Amplificador de Carga

Para além do transdutor de posição foi dada também uma especial atenção à célula de carga e ao correspondente amplificador de carga.

A célula de carga permite a medição de força, dentro de uma gama bastante alargada, sendo o seu máximo de 120 [kN]. No entanto, o amplificador de carga permite medições até um máximo de 23 [kN], sendo que para esforços de compressão, tem um sinal de saída de 0 a 10 [V].

Como tal e devido a limitações estruturais e funcionais da máquina, ajustou-se o ganho do amplificador para um valor correspondente a uma força máxima de 23 [kN]. A expressão que permite calcular o ganho a colocar no amplificador é:

$$F = \frac{Ganho}{Sensibilidade} \Leftrightarrow 23000 = \frac{Ganho}{4,3} \Leftrightarrow Ganho = 989 \times 10^2 \text{ pC} \quad (3.3)$$

No caso da força medida exceder o máximo definido, atinge-se um estado de excesso de carga (*Overload*) indicado por um *LED* no amplificador de carga, impossibilitando a continuação da leitura de força, através da célula de carga. Esta situação pode ser revertida de forma manual, utilizando um botão que se encontra instalado no quadro elétrico junto do amplificador de carga, que permite fazer “reset” a este estado.

No entanto, implementou-se uma solução automática, através da qual o autómato seja capaz de monitorizar a ocorrência destas situações e consequentemente fazer um “reset” automático. Para tal, recorreu-se a um relé através do qual se comanda a ativação do “reset”. Estas alterações implementadas ao nível elétrico podem ser consultadas na Figura 3.12.

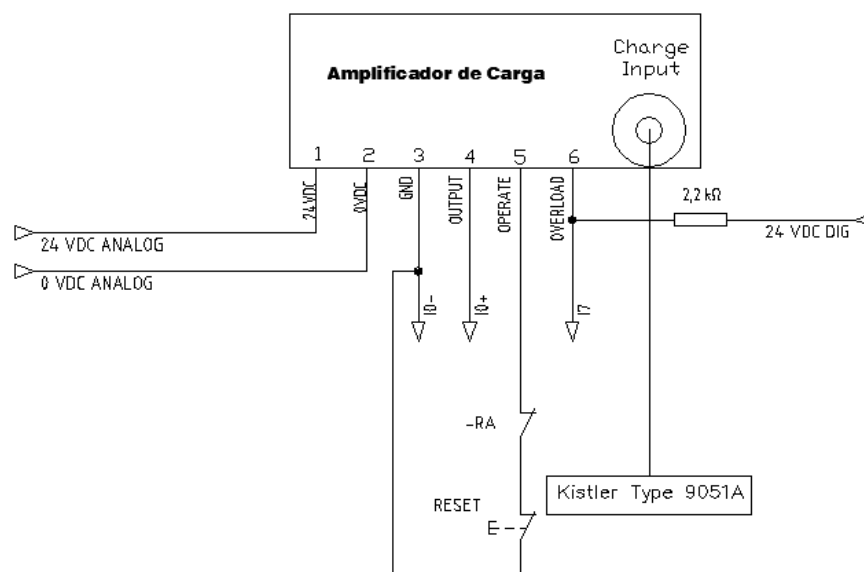


Figura 3.12 - Amplificador de carga - circuito elétrico implementado

3.4 Sistema de Comando e Controlo

3.4.1 Autómatos Programáveis

O controlador inicialmente utilizado na prensa, da National Instruments, é de difícil programação e de vocação não industrial. Como tal, procedeu-se à sua substituição por um autómato programável atual de elevada capacidade de processamento (tempo de execução por instrução de 0,022 [μs]). A escolha recaiu no autómato Modicon M251 da Schneider Electric, representado na Figura 3.13, por este já se encontrar disponível no laboratório de Óleo-hidráulica [21].



Figura 3.13 - Autómato programável Modicon M251 - Schneider Electric

Este autómato possui diversas ligações que asseguram a sua comunicação com outros dispositivos, nomeadamente:

- Porta CANopen;
- Porta Ethernet;
- Porta USB mini;
- Porta série (não isolada RS232/RS485);

Este autómato programável também é do tipo modular, ou seja, permite a adição de novos módulos consoante as necessidades da aplicação a que se destina [22] [23] [24].

Neste caso específico, para além do módulo base, são necessários mais seis módulos para poder ligar todos os componentes (Anexo A – Listagem de Sinais). Assim, na Tabela 3.3 apresentam-se os módulos necessários e a respetiva função.

Tabela 3.3 - Módulos do autômato e respectivas funções

| Módulo | Função |
|-------------------|--|
| Modicon TM3AI4 | Módulo de entradas analógicas – 4 entradas (12 bit) [25] |
| Modicon TM3AI4 | Módulo de entradas analógicas – 4 entradas (12 bit) [25] |
| Modicon TM3AI2H | Módulo de entradas analógicas – 2 entradas (16 bit) [26] |
| Modicon TM3AQ4 | Módulo de saídas analógicas – 4 saídas (12 bit) [27] |
| Modicon TM3DM24R | Módulo de entradas e saídas digitais – 16 entradas (não isoladas) e 8 saídas (por relé, não isoladas) [28] |
| Modicon TM3SAFL5R | Módulo de segurança [29] [30] |

O autômato programável e os respectivos módulos foram instalados no quadro elétrico – geral, como se pode observar na Figura 3.14.



Figura 3.14 - Instalação do autômato e respectivos módulos

Para a programação deste autômato utiliza-se o *software* SoMachine disponibilizado pelo fabricante [31]. Este autômato suporta diversas linguagens de programação, podendo a sua programação ser feita em:

- IL - Instruction List
- ST - Structured Text
- FBD - Function Block Diagram
- SFC - Sequential Function Chart
- LD - Ladder Diagram
- CFC – Countinuous Function Chart

3.4.2 Interface Homem/Máquina - HMI

No sistema inicialmente implementado, a comunicação com o controlador instalado da National Instruments, era feito através de um computador que se encontrava anexo à prensa hidráulica. Este tipo de solução de diálogo não é o mais adequado para uma máquina de cariz industrial, pois torna a máquina pouco flexível, ficando dependente do computador, que é sempre de mais difícil relação com um operador.

Portanto, procedeu-se à instalação de uma interface homem/máquina, que permite fazer o comando da máquina, através de um ecrã tátil policromático. A HMI (*Human Machine Interface*, em português Interface Homem/Máquina) em questão, também é da Schneider Electric tratando-se do modelo STU855, representada na Figura 3.15 [32]. A escolha recaiu sobre esta HMI, novamente, por esta já se encontrar disponível no laboratório de Óleo-hidráulica. As principais características da HMI são apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Características da HMI

| | |
|----------------------------|--|
| Ecrã | TFT LCD 5,7'' Resolução 320 x 240 pixéis (QVGA) 65536 Cores <i>Touchscreen</i> |
| Memória | Para a aplicação <i>flash</i> 32 MB (EPROM) Para dados de <i>backup</i> 64 kB (FRAM) Para correr a aplicação 64 MB (DRAM) |
| Ligações integradas | USB port - USB type A USB port - mini B USB COM1 <i>serial link female</i> RJ45, <i>interface</i> RS232C / RS485 Ethernet TCP/IP port |



Figura 3.15 - HMI STU855 - Schneider Electric

Para a programação da interface gráfica recorre-se também ao mesmo *software* SoMachine fornecido pela Schneider Electric, no qual existe uma secção específica para programação de HMI's utilizando o *software* Vijeo Designer. A ligação ao computador é assegurada pela porta mini USB. Por outro lado, a porta Ethernet permite a conexão da HMI ao autómato, assegurando uma ligação mais rápida do que a ligação tradicional, na qual se utiliza a porta série.

A HMI foi instalada no quadro elétrico - instrumentação, como se pode visualizar na Figura 3.16.



Figura 3.16 - Instalação da HMI

3.5 Sistema Elétrico

3.5.1 Circuito Elétrico

Ao nível do circuito elétrico implementado, e atendendo à inclusão de novos componentes e alterações projetadas, é necessário fazer uma revisão completa de todas as ligações e consequentemente refazer todo o circuito elétrico. O novo circuito elétrico encontra-se representado no Anexo B. Na Figura 3.17 apresenta-se o quadro elétrico - geral após a remodelação efetuada ao nível elétrico.



Figura 3.17 - Quadro elétrico - geral após a revisão do circuito elétrico

A principal alteração efetuada no circuito elétrico é a inclusão de um novo quadro, onde é feito o comando e a alimentação do variador de frequência que faz o comando e alimentação do motor elétrico, representado na Figura 3.18. A partir deste quadro é também possível ajustar a velocidade do motor elétrico. Os elementos constituintes deste quadro elétrico são: contactor, transformador, relé térmico, relés de comando, potenciômetro, fusíveis e botoneiras.



Figura 3.18 - Quadro elétrico para comando externo da fonte de energia

Através deste quadro implementou-se uma nova solução de comando da fonte de energia. Assim, têm-se duas soluções de comando, uma utilizando exclusivamente a HMI (Modo Interno) e a outra utilizando as botoneiras físicas presentes no quadro (Modo Externo), para o seu comando manual.

Para a seleção do modo de comando da fonte de energia, incluiu-se um seletor de três posições no quadro que contém a HMI. Este permite selecionar o modo de comando pretendido, sendo que a posição central corresponde a uma posição de inatividade (não funcionamento). Para que o autômato consiga monitorizar qual dos modos de comando se encontra selecionado, recorreu-se a dois contactos normalmente abertos, sendo cada um associado a cada posição ativa. Este seletor foi instalado no quadro elétrico que contém a HMI, como pode ser observado na Figura 3.19.



Figura 3.19 - Quadro elétrico - HMI

Como já foi mencionado no capítulo anterior, no circuito elétrico inicial nenhuma das fontes de alimentação era monitorizada por parte do autômato. Esta ausência de monitorização constituía uma falha ao nível da segurança da máquina. Assim, ambas as fontes passaram a ser monitorizadas, recorrendo a relés auxiliares para a transmissão da informação ao autômato.

Na Figura 3.20 pode-se ver o esquema adotado para a implementação desta alteração.

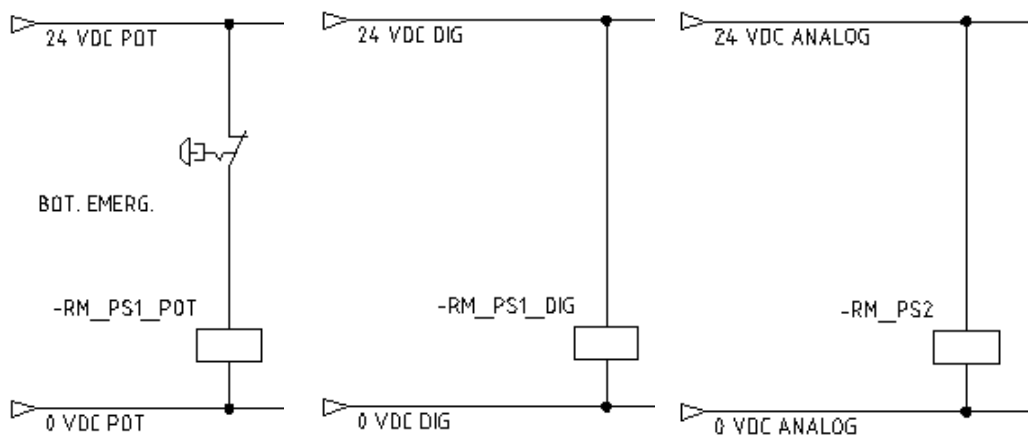


Figura 3.20 - Monitorização das fontes de alimentação

As bobinas dos relés RM_PS1_POT, RM_PS1_DIG e RM_PS2 são alimentadas pelas respectivas fontes de energia que se encontram a monitorizar, sendo que é utilizado um contacto de cada relé para fazer a conexão ao autómato. Após esta implementação obteve-se:

- monitorização da fonte analógica;
- monitorização da fonte comutada – potência;
- monitorização da fonte comutada – comando;

3.6 Segurança

A segurança de máquinas é um ponto fulcral na automatização e na renovação de uma máquina, permitindo proteger pessoas e equipamentos. Como tal, é de extrema importância projetar uma solução de segurança adequada para este tipo de máquina, recorrendo a alguns dispositivos de segurança – Figura 3.21.



Figura 3.21 - Dispositivos de segurança

Depois da análise realizada ao funcionamento da máquina, no ponto 3.1.3, conclui-se que se trata de uma máquina perigosa, não só atendendo à sua função processual, como também às velocidades de trabalho envolvidas durante o funcionamento da máquina, que poderão ser superiores a 100 [mm/s].

A solução idealizada para o sistema de segurança incorpora os seguintes dispositivos:

- Botoneira de emergência;
- Barreiras de segurança fotoelétricas;

De forma a complementar estes dispositivos de segurança, foi pensada a inclusão de uma botoneira de emergência virtual no *software* de controlo da máquina, com função idêntica à da botoneira de emergência física. Assim, obtém-se uma redundância de dispositivos de segurança, com um consequente aumento da segurança para o utilizador.

A solução concebida consiste na utilização de duas barreiras de segurança fotoelétricas na parte frontal da máquina, com proteção de dedos e mãos, para não permitir o acesso à zona

de trabalho, enquanto o atuador se encontrar em movimento. Por outro lado, a instalação de uma botoneira física de paragem de emergência que permita ao utilizador, por qualquer motivo, interromper o normal funcionamento da máquina. Esta botoneira seria complementada por uma botoneira de emergência virtual, presente no ecrã na HMI, com o mesmo princípio de funcionamento. Por fim, e idealmente, o restante da máquina seria protegido por uma estrutura em policarbonato.

Para a implementação desta solução recorreu-se a um módulo de segurança, representado na Figura 3.22, que foi anexado ao autómato, permitindo a ligação de todos os elementos de segurança, acima enumerados, com o autómato.



Figura 3.22 - Módulo de segurança - Schneider Eletric

3.6.1 Implementação

Procedeu-se à instalação do módulo de segurança junto dos restantes módulos do autómato. No entanto, este não foi utilizado para a conexão dos dispositivos de segurança, visto que apenas se procedeu à instalação da botoneira de emergência física. Como tal, implementou-se um relé com função de relé de segurança (RS1), sendo necessário, depois da aquisição das barreiras fotoelétricas, a interligação destes dispositivos com o módulo de segurança. Esta solução pode ser vista em maior detalhe consultando o esquema elétrico que se encontra no Anexo B.

A botoneira de emergência foi instalada na parte frontal da prensa no lado direito, como pode ser observado na Figura 3.23.

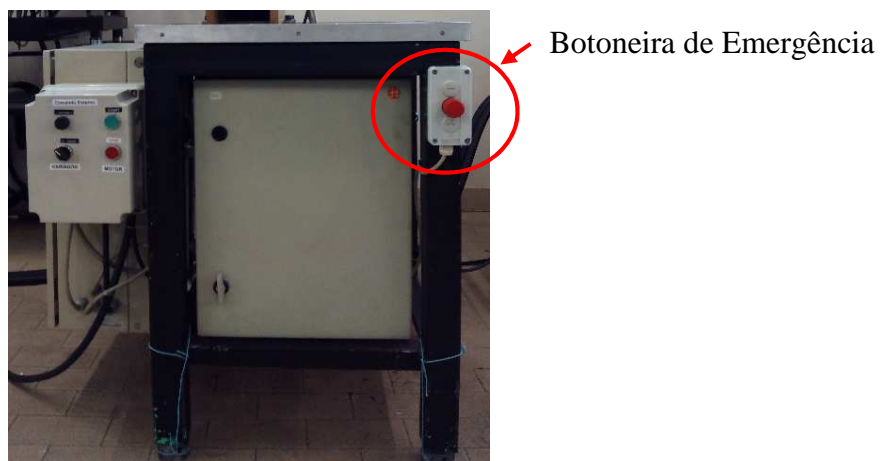


Figura 3.23 - Instalação da botoneira de emergência

Para a monitorização da botoneira de emergência física, utiliza-se um relé com um contacto normalmente aberto para reconhecimento por parte do autómato da atuação deste elemento de emergência, sendo esta alteração visível na Figura 3.24.

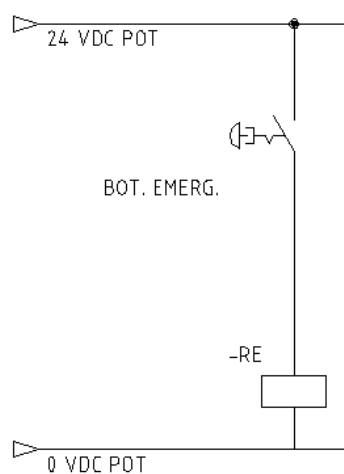


Figura 3.24 - Monitorização da botoneira de emergência física

3.7 Análise ao Equipamento Final

Após realizadas todas as alterações, a prensa hidráulica – Figura 3.25 – está apta e dotada de todas as capacidades físicas para ser utilizada.



Figura 3.25 - Prensa hidráulica após as alterações tecnológicas efetuadas

Todas as alterações propostas e implementadas na máquina permitem que esta execute agora movimentos com grande capacidade dinâmica, particularmente movimentos com posição controlável, movimentos com velocidade controlável ou movimentos com força controlável.

3.7.1 Testes e Resultados

Após todas as modificações realizadas, desenvolveu-se um *software* de controlo básico que permitisse realizar alguns testes, para verificar o correto funcionamento de todos os meios disponíveis, após todas as alterações implementadas.

➤ Caraterística experimental da válvula limitadora de pressão proporcional

Após a instalação da nova válvula limitadora de pressão efetuou-se um teste ao seu comando para verificar se correspondia às exigências de funcionamento do sistema. Realizaram-se três ensaios para determinar a relação entre o comando da válvula e a pressão, para diferentes caudais. O resultado pode ser observado na Figura 3.26, beneficiando da disponibilidade de variação de velocidade, numa relação 3:1 no motor elétrico da bomba hidráulica.

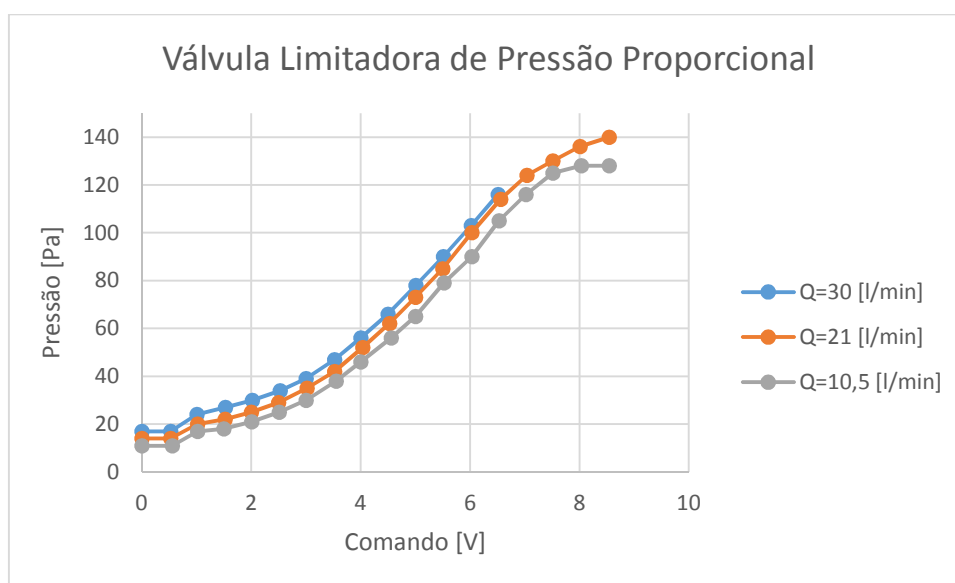


Figura 3.26 - Caraterística experimental da válvula limitadora de pressão proporcional

Como se pode observar, consegue-se um comando rigoroso para uma gama alargada de pressões, sendo que o valor de pressão não é significativamente afetada pelo caudal que atravessa a válvula. Estes resultados encontram-se de acordo com o esperado, atendendo à caraterística fornecida pelo fabricante.

➤ **Caraterística experimental da válvula direcional proporcional de elevada dinâmica**

Após a instalação da nova válvula direcional proporcional, efetuou-se um teste para determinar a sua caraterística de funcionamento. Assim, realizou-se um ensaio “Caudal vs Comando da Válvula”, para determinar o comportamento estático da válvula, como pode ser observado na Figura 3.27.

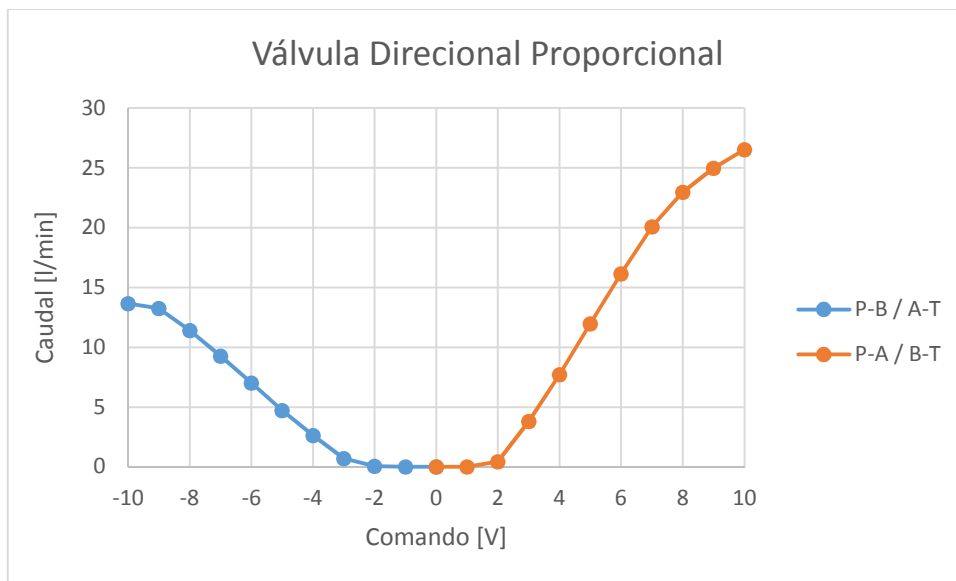


Figura 3.27 - Caraterística experimental da válvula direcional proporcional

Como se pode observar e de acordo com o esperado, o caudal da válvula é não linear, evidenciando uma “zona morta” até aproximadamente 20% do comando da válvula, em ambas as direções de comando. Para além disso, a válvula possui ganhos diferentes de caudal, nas suas vias A e B, sendo o caudal que circula de P-B aproximadamente metade do que circula de P-A. Estes resultados encontram-se de acordo com o esperado, atendendo à caraterística fornecida pelo fabricante.

➤ Potência consumida pelo motor elétrico

O principal objetivo da inclusão do variador de frequência passa pelo aumento da eficiência energética, durante o funcionamento da máquina. Como tal, procedeu-se à realização de alguns testes para comprovar que, utilizando velocidades de rotação do motor diferentes, se obtinham potências consumidas diferentes, para diferentes caudais disponibilizados à máquina.

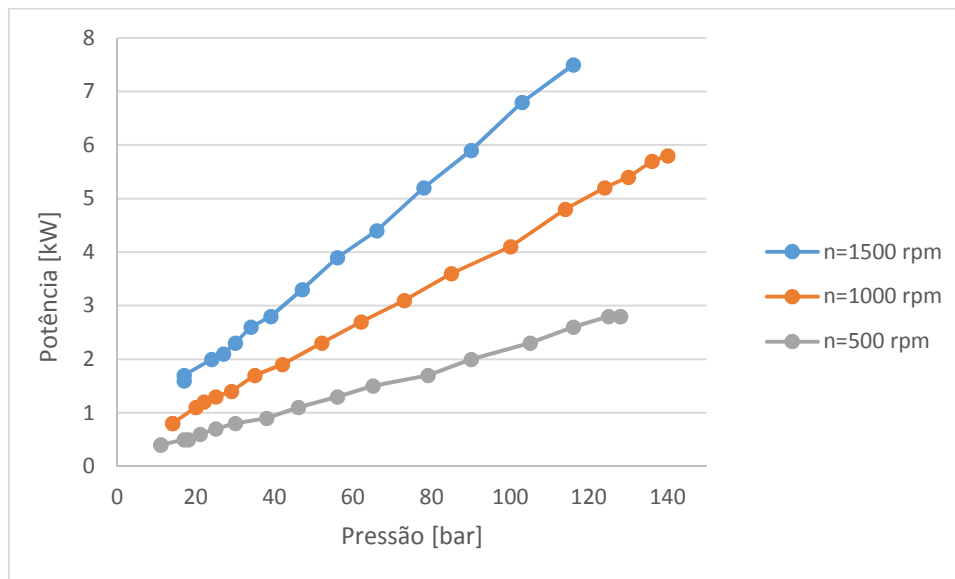


Figura 3.28 - Potência consumida pelo motor elétrico

Como se pode observar, a potência elétrica consumida varia linearmente com a pressão e também com a velocidade de rotação (caudal). Este facto constitui a principal razão para a inclusão nesta máquina de um variador de frequência, proporcionando uma capacidade para ajustar a potência consumida às necessidades da máquina. Deste modo passa a ser possível ajustar quer o caudal quer a pressão de um modo contínuo, do que resulta uma potência consumida variável.

4 *Software* de Controlo e Interface Gráfica

Após a análise ao produto final obtido, resultante das alterações tecnológicas realizadas e para complementar o processo de automatização desta máquina, foi desenvolvido um *software* de controlo capaz de demonstrar as novas capacidades disponíveis. Este *software* deve considerar não só o funcionamento normal deste tipo de máquinas, como todas as possíveis situações de emergência inerentes.

Neste capítulo apresenta-se a estrutura concebida e implementada para a programação tanto do autómato, como da HMI, para cumprir as exigências de funcionamento normal. Para além disso é apresentado ainda o “Modo Manual”, que permite um comando genérico do movimento do atuador hidráulico.

Assim, este capítulo encontra-se organizado da seguinte forma:

- **Estrutura da programação do *software*** - apresentação das diferentes secções de programação do *software*;
- **Desenvolvimento da interface gráfica do *software*** - apresentação dos ecrãs desenvolvidos para a HMI e respetiva estrutura e organização;
- **Modo Manual** - apresentação do modo de comando manual desenvolvido, assim como a respetiva interface gráfica;

4.1 Estrutura da Programação do *Software*

A programação do autômato foi executada recorrendo às linguagens de programação SFC (Sequential Function Chart), LD (Ladder Diagram) e CFC (Continuous Function Chart) [33] [34]. O programa desenvolvido está dividido em três subprogramas: Global, Emergência e Funcionamento, sendo que a estrutura geral de cada subprograma é traduzida por um GRAFCET (linguagem SFC). Estes funcionam em paralelo, sendo que cada um tem um nível de prioridade definido.

4.1.1 Subprograma - Global

O subprograma “Global” – Figura 4.1 – faz, por um lado, a inicialização e o tratamento de variáveis globais, isto é, variáveis que são partilhadas pelos vários modos de funcionamento, sendo essencialmente variáveis de monitorização. Por outro lado, faz a supervisão funcional da máquina para avaliar o seu correto funcionamento e a emissão de avisos de mau funcionamento. Este subprograma encontra-se sempre em *loop* contínuo, estando sempre as variáveis a ser atualizadas e é constituído por duas etapas funcionais. Na etapa “Geral” são tratadas todas as variáveis relativas à instrumentação que se destinam apenas a monitorizações e apresentação de informações, estando incluídos, por exemplo, os transdutores. Na etapa “Aviso” são tratadas variáveis relacionadas com situações de mau funcionamento da máquina que retornam um aviso para o utilizador. Para a programação destas etapas, utilizou-se a linguagem CFC.

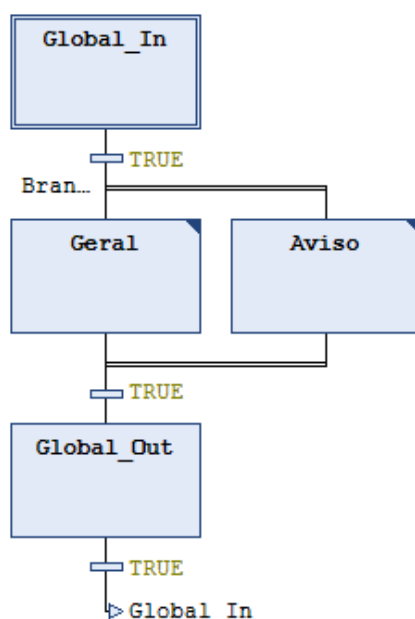


Figura 4.1 - Estrutura geral do Subprograma - Global

4.1.2 Subprograma - Emergência

No subprograma “Emergência” – Figura 4.2 – são tratadas todas as variáveis relacionadas com condições de emergência, nomeadamente:

- Monitorização das botoneiras de emergência - física e virtual;
- Monitorização das fontes de alimentação;
- Monitorização de avaria do variador de frequência e motor elétrico;
- Monitorização da temperatura do fluido hidráulico;

Assim sendo, as condições de emergência encontram-se sempre a ser verificadas e, caso alguma seja ativada, é ativada uma etapa na qual se faz a paragem da máquina e emissão de aviso de alarme. No caso da condição de alarme deixar de existir, permite-se o rearme do funcionamento normal da toda a máquina, sendo que a máquina retorna ao menu inicial.

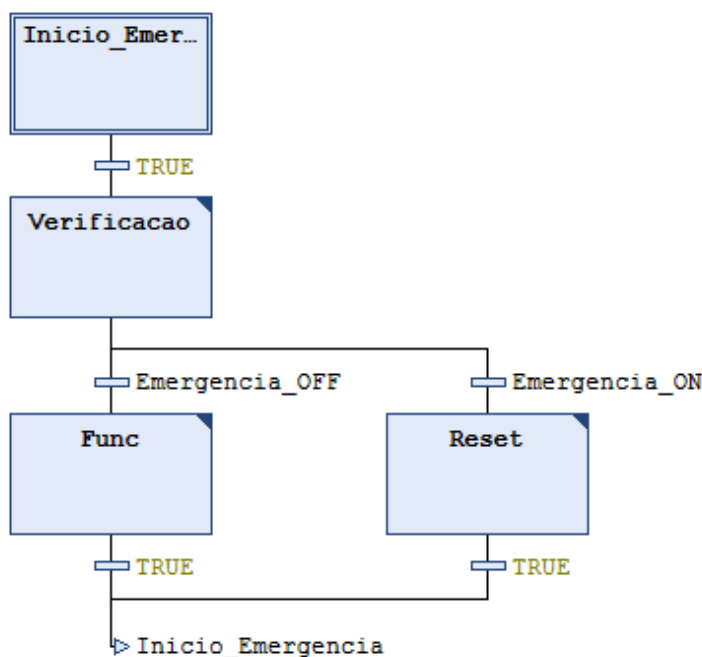


Figura 4.2 - Estrutura geral do Subprograma - Emergência

4.1.3 Subprograma - Funcionamento

Por último, o subprograma “Funcionamento” – Figura 4.3 – tem como fim a execução da programação desenvolvida tanto para o “Modo Manual”, como para os modos “Funcionamento em Malha Aberta” e “Funcionamento em Malha Fechada”, nos quais estão inseridas as demonstrações funcionais programadas.

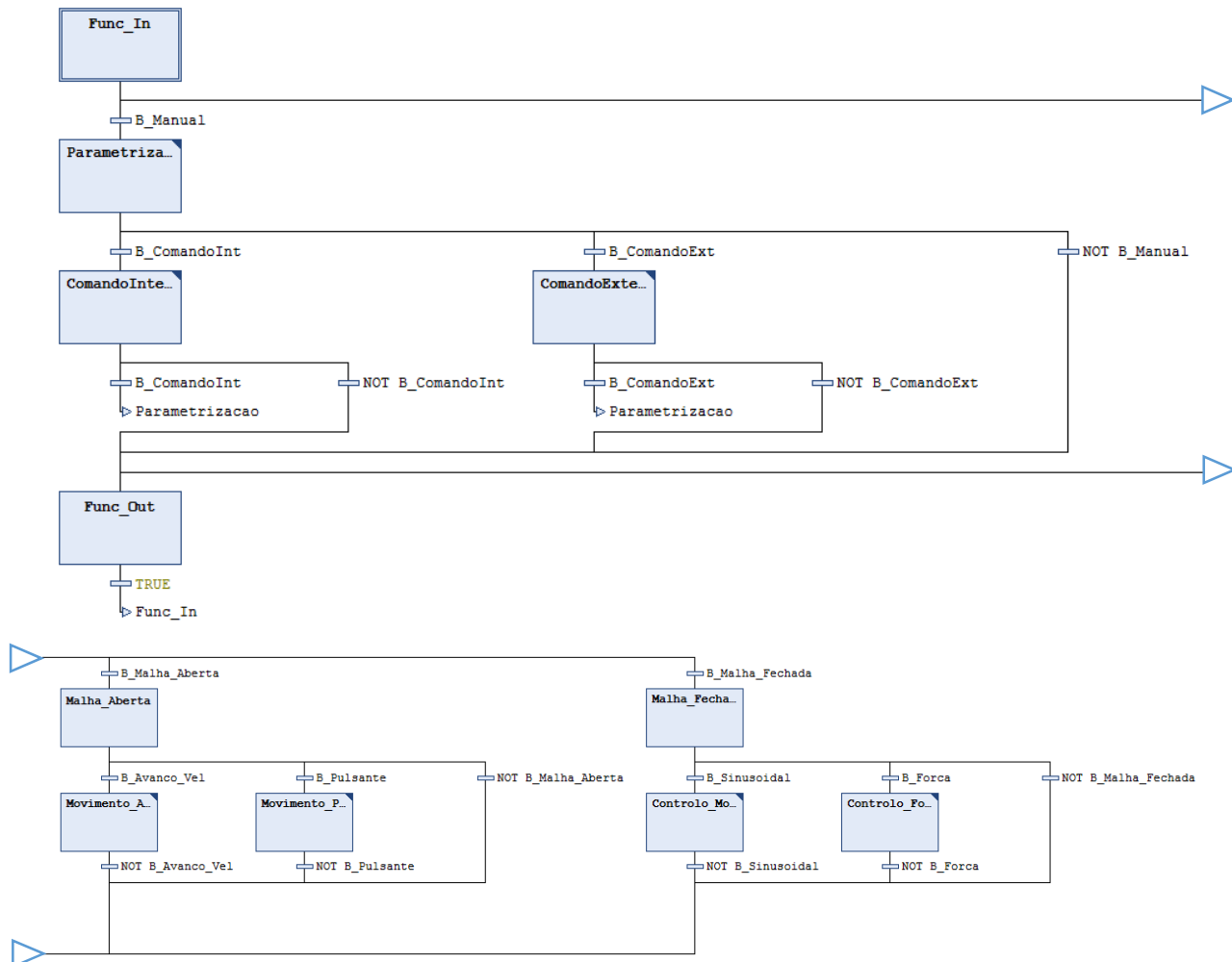


Figura 4.3 - Estrutura geral do Subprograma - Funcionamento

Cada modo de funcionamento tem uma etapa associada na qual está inserida a programação desse modo de comando. No “Modo Manual” recorreu-se à linguagem LD, enquanto nos modos de “Funcionamento em Malha Aberta” e “Funcionamento em Malha Fechada” se utilizou a linguagem CFC.

Para a interação entre o utilizador e a máquina, desenvolveu-se uma interface gráfica utilizando o Vijeo Designer, presente no SoMachine. Esta interface é constituída por um conjunto de ecrãs que possibilitam ao utilizador a monitorização e a comunicação com o equipamento.

4.2 Desenvolvimento da Interface Gráfica do *Software*

O objetivo da interface homem/máquina é permitir ao utilizador comandar e monitorizar toda a atividade da máquina de forma simples e segura. Assim, desenvolveu-se uma interface gráfica de fácil utilização e compreensão para o utilizador, de acordo com o funcionamento pretendido para este tipo de máquinas [35].

O ecrã inicial, representado na Figura 4.4, é meramente informativo, apresentando apenas dados sobre o presente trabalho. Ao premir este ecrã em qualquer zona da janela, surge um novo ecrã “Menu Principal”, onde o operador seleciona o tipo de utilização que se pretende efetuar na máquina.



Figura 4.4 - Ecrã inicial

Após surgir o ecrã “Menu Principal”, representado na Figura 4.5, o utilizador pode escolher o tipo de funcionamento pretendido para a máquina, utilizando o botão de seleção correspondente.



Figura 4.5 - Ecrã “Menu Principal”

Neste ecrã é possível aceder também a uma opção de “Ajuda” que, quando selecionada, apresenta uma breve descrição dos modos de utilização disponíveis. Por último, existe uma opção de “Sobre” que apresenta pequenas informações sobre o presente trabalho. Os ecrãs “Sobre” e “Ajuda” encontram-se representados na Figura 4.6.



Figura 4.6 - Ecrã “Sobre” e Ecrã “Ajuda”

4.2.1 Estrutura da Programação e Navegação

A programação e navegação desenvolvida para a interface gráfica assenta na estrutura representada na Figura 4.7.

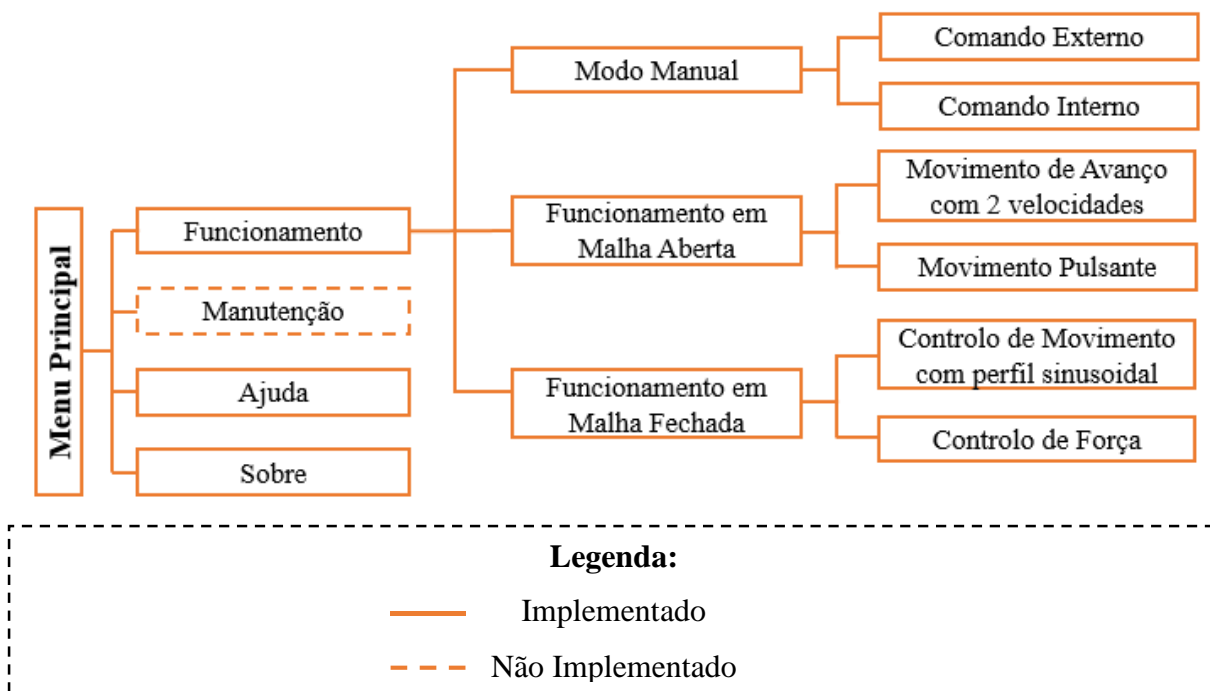


Figura 4.7 - Estrutura da programação e navegação

A secção de funcionamento divide-se em três modos, nomeadamente:

- “Modo Manual”;
- “Funcionamento em Malha Aberta”;
- “Funcionamento em Malha Fechada”;

O “Modo Manual” destina-se a um comando genérico do movimento do atuador hidráulico, onde se implementam essencialmente ações resultantes de condições lógicas combinacionais, sob comando sensível por parte do operador.

Os modos de “Funcionamento em Malha Aberta” e “Funcionamento em Malha Fechada” caracterizam-se por uma maior complexidade e automatização, com sequência de ações parametrizáveis. Estes destinam-se à realização de demonstrações funcionais, tendo sido implementadas, no total, quatro demonstrações. O principal objetivo destas demonstrações passa por evidenciar as novas capacidades funcionais da máquina, consequentes das alterações tecnológicas realizadas.

Pretende-se assim, através de pequenas demonstrações, comprovar o correto funcionamento da máquina e mostrar as potencialidades desta para a realização de outro tipo de aplicações quer sejam didáticas ou industriais.

4.2.2 Configuração Geral dos Ecrãs

Todos os ecrãs possuem uma configuração geral definida, para permitir obter uma interface gráfica mais intuitiva e de fácil navegação, representada na Figura 4.8.

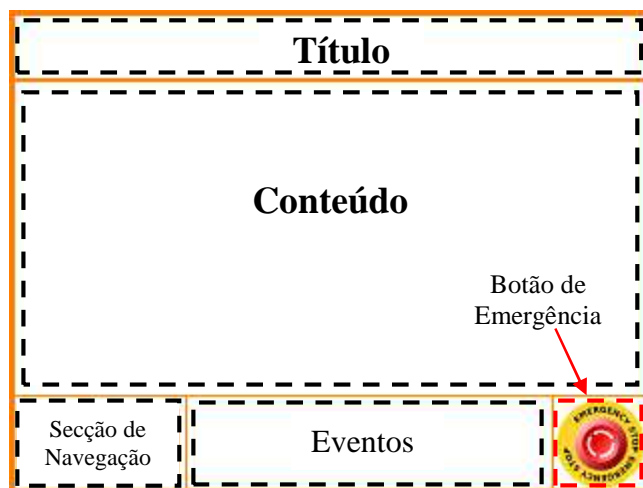


Figura 4.8 - Configuração geral dos ecrãs











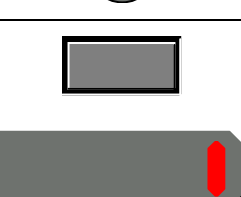
A navegação entre ecrãs durante o funcionamento da máquina não é permitida, sendo que sempre que se pretende mudar de modo de funcionamento, ou alterar a parametrização definida para ele, é obrigatório que o movimento seja interrompido e a central hidráulica desligada, por motivos de segurança.

Em todos os modos de funcionamento existe uma secção de eventos na qual são apresentadas, em cada momento, informações relativas ao estado do atuador e da central hidráulica.

Todos os ecrãs possuem um botão de emergência que, em qualquer momento, pode ser premido e utilizado de forma a garantir a segurança do utilizador e do equipamento.

Nos diversos ecrãs criados poderão ser encontrados os botões/ícones representados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Botões/Ícones da interface gráfica

| Símbolo | Descrição e Função |
|---|---|
|  | Botão “Home” – abertura do menu principal |
|  | Botão “Voltar” – abertura do ecrã anterior |
|  | Emergência – abertura do ecrã de atuação de emergência |
|  | Botão “Recuo” – recuo do atuador |
|  | Botão “Avanço” – avanço do atuador |
|  | Botão “Iniciar” – início de uma demonstração de funcionamento |
|  | Botão “Finalizar” – fim de uma demonstração de funcionamento |
|  | Botão “Confirmar” – confirmação de uma seleção |
|  | Botão “Cancelar” – cancelamento de uma seleção |
|  | Botão “Selecionar” – seleção dos ecrãs |
|  | Botões “Selecionar” – seleção universal |

4.2.3 Emergência

Como foi referido no início deste capítulo, a programação do autómato inclui um subprograma relativo a condições de emergência. Assim, foi desenvolvido um ecrã específico e representativo deste tipo de situações para a interface gráfica. A verificação de uma condição de emergência impede o funcionamento da máquina até que esta deixe de se verificar e o utilizador autorize o rearme da máquina.

Quando este estado é ativado a central hidráulica é desligada e a máquina interrompe o seu normal funcionamento, colocando todas as variáveis no estado inicial “0”. Assim, sempre que ocorra uma situação de emergência, o ecrã representado na Figura 4.9 surge na HMI, informando o utilizador da condição que lhe deu origem.

Após a ativação do estado de emergência, o programa apenas permitirá que o utilizador faça o rearme do estado de emergência quando a condição que a ativou deixar de se verificar. Depois de validado o rearme, o ecrã de emergência é fechado e retorna ao ecrã “Menu Principal”.



Figura 4.9 - Ecrã de atuação de paragem de emergência

4.2.4 Avisos

Além de condições de emergência, a programação do autómato inclui também uma secção de um subprograma relativa a condições de aviso, sendo que neste caso estas não impedem diretamente o normal funcionamento da máquina. No entanto, em função do tipo de condição que gerou o aviso, poderá a máquina ser levada a não voltar a reiniciar um modo de funcionamento.

Para o efeito, foi desenvolvido um ecrã específico e representativo deste tipo de situações para a interface gráfica. A verificação de uma condição de aviso faz surgir o ecrã representado na Figura 4.10 apenas como aviso, sendo que, no caso da máquina estar em funcionamento, este não é interrompido. Quando ocorre uma situação de aviso é fornecida ao utilizador a informação necessária à compreensão do problema que afeta a máquina.



Figura 4.10 - Ecrã de informação de aviso

4.3 Modo Manual

O primeiro modo de funcionamento implementado, denominado “Modo Manual”, permite um comando genérico e global da máquina, nomeadamente do movimento do atuador entre os detetores de fim de curso, distanciados cerca de 75 [mm]. Tem como principal objetivo permitir ao utilizador comandar o atuador de um modo sensível, a baixa velocidade e com baixa capacidade de força, tendo em atenção preocupações de segurança, permitindo realizar movimentos de vaivém. Durante o comando do movimento, o utilizador tem acesso a diversas monitorizações e informações sobre o estado dos diversos componentes presentes na máquina.

Neste modo de funcionamento, existe ainda a possibilidade de configurar o modo de comando da fonte de energia de duas formas:

1. Utilizando exclusivamente a HMI, denominando este modo de comando como **“Comando Interno”**;
2. Utilizando o quadro elétrico próprio de comando do variador apresentado no capítulo 3, na Figura 3.18, designando este modo de comando como **“Comando Externo”**;

Como já foi mencionado no capítulo anterior, esta configuração é feita num seletor rotativo de três posições instalado por baixo da HMI, sendo que é indicado ao utilizador que é necessária a sua seleção e confirmação, quando seleciona este modo de funcionamento, como se pode observar na Figura 4.11.

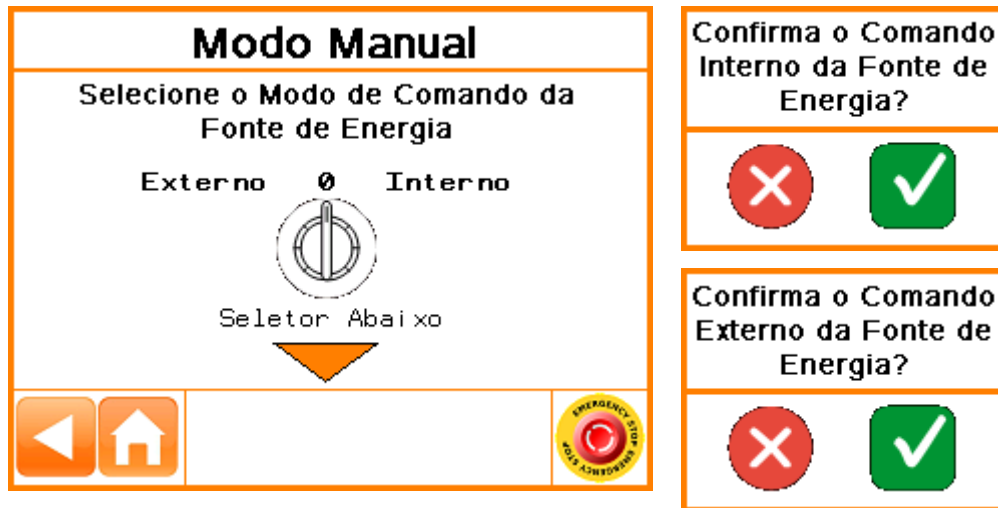


Figura 4.11 - Ecrã de configuração do modo de comando da fonte de energia

Através desta alternativa de comando da fonte de energia pretende-se dar a possibilidade de a central hidráulica poder ter uma utilização que não seja dependente da sua associação à prensa laboratorial.

Na Figura 4.12 encontra-se representado o ecrã correspondente ao funcionamento em “Modo Manual – Comando Interno”.

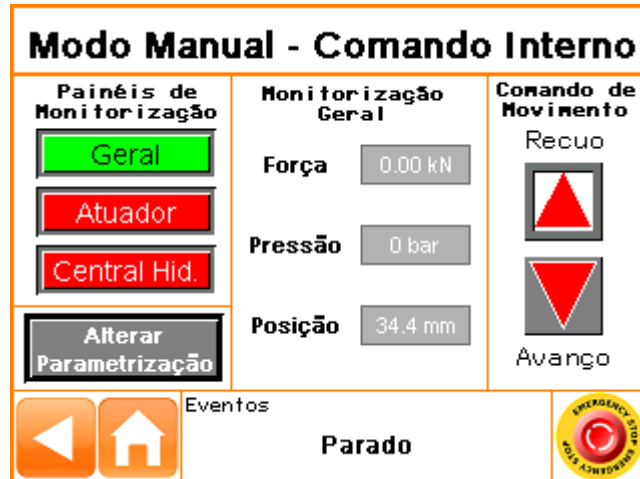


Figura 4.12 - Ecrã de funcionamento do “Modo Manual - Comando Interno”

O ecrã correspondente ao funcionamento em “Modo Manual – Comando Externo” é idêntico, sendo a única diferença a forma como é comandada a fonte de energia.

Tal como pode ser observado, este ecrã encontra-se dividido em três zonas, sendo:

- a primeira zona, na qual se pode seleccionar o painel de monitorização a apresentar;
- a segunda zona, destinada às monitorizações correspondentes ao painel seleccionado;
- a terceira zona, dedicada ao comando sensível do movimento do atuador;

Além das três zonas enumeradas, existe ainda uma secção que permite a alteração da parametrização das variáveis de funcionamento, para este modo de funcionamento.

As monitorizações encontram-se divididas em três painéis, como se pode observar na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Painéis de Monitorização

| Informações | Painel |
|--|---|
| Monitorização Geral | |
| <ul style="list-style-type: none"> Força [kN]; Pressão do sistema [bar]; Posição do punção [mm]; | <div> <div> Modo Manual - Comando Interno </div> <div> <div> Painéis de Monitorização <div>Geral</div> <div>Atuador</div> <div>Central Hid.</div> <div>Alterar Parametrização</div> </div> <div> Monitorização Geral <div>Força 0.00 kN</div> <div>Pressão 0 bar</div> <div>Posição 34.4 mm</div> </div> <div> Comando de Movimento <div>Recuo</div> <div>Avango</div> </div> </div> <div> <div> <div>◀</div> <div>🏠</div> </div> <div>Eventos</div> <div>Parado</div> <div> </div> </div> </div> |
| Monitorização do Atuador | |
| <ul style="list-style-type: none"> Pressão na câmara principal [bar]; Pressão na câmara secundária [bar]; Comando da válvula direcional proporcional [%]; | <div> <div> Modo Manual - Comando Interno </div> <div> <div> Painéis de Monitorização <div>Geral</div> <div>Atuador</div> <div>Central Hid.</div> <div>Alterar Parametrização</div> </div> <div> Monitorização do Atuador <div>Câm. Princ. 0 bar</div> <div>Câm. Sec. 0 bar</div> <div>Com. Válv. 0 %</div> </div> <div> Comando de Movimento <div>Recuo</div> <div>Avango</div> </div> </div> <div> <div> <div>◀</div> <div>🏠</div> </div> <div>Eventos</div> <div>Parado</div> <div> </div> </div> </div> |
| Monitorização da Central Hidráulica | |
| <ul style="list-style-type: none"> Potência consumida [kW]; Velocidade do motor [rpm]; Temperatura do fluido hidráulico [°C]; | <div> <div> Modo Manual - Comando Interno </div> <div> <div> Painéis de Monitorização <div>Geral</div> <div>Atuador</div> <div>Central Hid.</div> <div>Alterar Parametrização</div> </div> <div> Monitorização da Central Hid. <div>Pot. Con. 0.0 kW</div> <div>Vel. Mot. 0 rpm</div> <div>Temper. 25 C</div> </div> <div> Comando de Movimento <div>Recuo</div> <div>Avango</div> </div> </div> <div> <div> <div>◀</div> <div>🏠</div> </div> <div>Eventos</div> <div>Parado</div> <div> </div> </div> </div> |

Estas monitorizações constituem-se uma mais-valia, pois permitem ao utilizador um acompanhamento permanente de todas as informações disponíveis na máquina durante o seu funcionamento.

Assim, no modo “Comando Interno”, seleccionando permanentemente um dos botões de movimento do atuador (Avanço ou Recuo), a central hidráulica entra em funcionamento e o atuador realiza o movimento seleccionado. O movimento é interrompido logo que o botão de comando de movimento deixa de ser seleccionado. Caso o mesmo, ou outro botão seja seleccionado, o atuador entra novamente em movimento de avanço ou recuo. Caso o tempo de inatividade de movimento ultrapasse o tempo limite de inatividade (5 segundos), a central hidráulica desligar-se-á.

No caso do modo “Comando Externo” – Figura 4.13 – ser seleccionado, é necessário atuar as botoneiras correspondentes do quadro elétrico, do variador de frequência do motor elétrico, permitindo a regulação da velocidade através do potenciómetro instalado, sendo que este procedimento é solicitado ao utilizador através da apresentação de uma janela *popup*.

Por fim, o comando de movimento segue os mesmos passos implementados no modo “Comando Interno”. No caso de ser excedido o tempo limite de início do movimento é apresentada uma janela *popup* na qual é solicitado ao utilizador que desligue a central hidráulica, novamente através do quadro elétrico correspondente.



Figura 4.13 - Ecrã de funcionamento do “Modo Manual - Comando Externo”

O modo manual de qualquer máquina industrial, com movimento associado, é um modo de funcionamento que, por imposição de segurança, pressupõe condições de funcionamento com baixa capacidade de força e velocidade, de forma a não colocar em causa a segurança do utilizador/operador. Para que este modo pudesse ser ajustável e flexível durante o seu funcionamento, introduziu-se uma secção na qual é possível variar certos parâmetros de

funcionamento, dentro de limites de segurança. Assim, foi desenvolvido um ecrã denominado “Configurar Parametrização”, onde é possível alterar alguns parâmetros relativos ao funcionamento geral da máquina em “Modo Manual”, para ambos os modos de comando da fonte de energia. Este ecrã pode ser visto com maior detalhe na Figura 4.14.

| Configurar Parametrização | |
|---|---|
| <div> <div>Parâmetros Iniciais</div> <div>Alterar Parâmetros</div> </div> | |
| Parâmetros Atuais | Pos. Lim. Sup. <input type="text" value="0 mm"/> |
| | Pos. Lim. Inf. <input type="text" value="75 mm"/> |
| | Veloc. Atuador <input type="text" value="100 %"/> |
| | Veloc. Motor <input type="text" value="35 %"/> |
| <div> <div>◀</div> <div>🏠</div> <div>Validar Parametrização</div> <div>✓</div> <div>EMERGENCY STOP</div> </div> | |

Figura 4.14 - Ecrã de configuração da parametrização do “Modo Manual”

O utilizador poderá definir vários parâmetros funcionais, tais como:

- Posição limite de paragem superior [mm];
- Posição limite de paragem inferior [mm];
- Velocidade do atuador hidráulico [%] (sendo 100% o limite de segurança);
- Velocidade de rotação do motor [%] (sendo 100% a velocidade máxima), apenas configurável no Modo Manual Comando Interno;

O curso de trabalho disponível é de aproximadamente 75 [mm] e, como tal, as posições limite superior e inferior podem ser definidas num intervalo que varia desde 0 a 75 [mm]. Estas configurações permitem ter disponível um curso de trabalho ajustável.

No que toca à velocidade de rotação do motor elétrico, esta pode ser ajustada desde 500 a 1500 [rpm]. Por defeito, no modo manual este valor encontra-se definido para 500 [rpm], correspondendo este valor a sensivelmente 30 [%] do caudal máximo da bomba. Este valor é suficiente para garantir um correto funcionamento deste modo de comando e permite também, uma otimização do consumo energético da máquina.

Na Tabela 4.3 apresenta-se um teste experimental ao “Modo Manual”, no qual se utilizaram diferentes configurações de parametrização e se verificou efeito no sistema, ao nível da potência consumida pelo motor elétrico.

Tabela 4.3 - Teste experimental - Modo Manual

| Parametrização | Parâmetros Funcionais Obtidos |
|--|--|
| Velocidade do atuador = 100 [%] * Velocidade do motor = 35 [%] | Potência consumida = 0,5 [kW] (6,7% da potência instalada) |
| Velocidade do atuador = 100 [%] * Velocidade do motor = 100 [%] | Potência consumida = 1,7 [kW] (22,7% da potência instalada) |

* da velocidade limite de segurança

Como pode ser observado na tabela anterior, variando a velocidade do motor e utilizando os mesmos parâmetros funcionais, obtêm-se potências consumidas pelo motor diferentes, mesmo limitadas pela baixa pressão utilizada neste modo de funcionamento. Assim, para a mesma velocidade do atuador e ajustando a velocidade do motor elétrico, é possível a otimização energética do sistema, sem perdas de desempenho ao nível funcional.

Por motivos de segurança, a velocidade associada ao movimento do atuador neste modo de comando é baixa. No entanto, este valor pode ser parametrizado dentro de certos limites de segurança. Assim, a velocidade máxima de segurança é de aproximadamente 10 [%] da velocidade máxima contínua do atuador, obtendo-se assim, uma velocidade máxima para este modo de comando de aproximadamente 15 [mm/s]. O comando sensível do movimento do atuador, conjuntamente com a parametrização da velocidade, poderá permitir um ajuste mais rigoroso do posicionamento do cilindro hidráulico, para posteriormente ser utilizado num modo de comando automático.

Para um movimento em modo manual mais lento, a velocidade pode ser ajustada desde o valor máximo de 15 [mm/s] (100% da velocidade em modo manual) até 10% dessa velocidade, por motivos de necessidade de preparação de algum trabalho na máquina.

Por questões de segurança, para além da velocidade associada ao movimento do atuador ser baixa, também a sua capacidade de força deve ser baixa. A pressão máxima da bomba é afetada pela velocidade de rotação do motor, podendo variar sensivelmente desde 10 a 16 [bar]. Esta gama de pressões poderá permitir uma capacidade máxima de força estática de compressão de aproximadamente 5 [kN].

Sendo esta força relativamente elevada por razões de segurança, logo que 10% desta força for detetada na célula de carga o movimento é terminado. No entanto, caso o operador volte a carregar no botão de avanço de movimento, a força poderá subir até ao limite definido de 5 [kN], uma vez que deste modo se garantiu que o operador pretendeu, efetivamente, continuar o movimento de avanço.

Por defeito, estes valores encontram-se definidos com o valor padrão para este modo de funcionamento, não sendo necessária a sua alteração permanente sempre que se pretender

operar com este modo de comando. A alteração da parametrização apenas é possível e acessível com a central hidráulica desligada, por questões de segurança.

Com este ecrã de parametrização, aumentou-se a flexibilidade funcional de um modo simples, através do qual o utilizador poderá ajustar o “Modo Manual”, de acordo com as necessidades exigidas, quer funcionais quer energéticas e verificar as alterações no comportamento da máquina através dos painéis de monitorização, criados para o efeito e descritos anteriormente.

A flexibilidade funcional deste modo de comando poderá complementar outros modos de comando, que possuam um funcionamento automático e nos quais seja necessário definir parâmetros funcionais com algum rigor.

5 Demonstrações Funcionais

De forma a complementar a renovação tecnológica da prensa hidráulica de laboratório PHC 1003, foram desenvolvidas demonstrações funcionais de forma a comprovar o desempenho da solução de automação implementada e demonstrar as suas novas capacidades e potencialidades. Estas demonstrações utilizam o comando interno da fonte de energia, uma vez que o controlo da fonte de energia é determinante para o bom desempenho da máquina e encontram-se divididas por dois modos de funcionamento:

- **Funcionamento em Malha Aberta;**
- **Funcionamento em Malha Fechada;**

No modo de “Funcionamento em Malha Aberta”, apresentam-se duas demonstrações funcionais automatizadas, que permitem demonstrar as potencialidades da máquina através da simulação de movimentos típicos de utilização em aplicações industriais, nas quais o controlo de movimento do atuador é realizado em malha aberta. Para além disso, estas demonstrações destinam-se também a comprovar o correto funcionamento de todos os meios tecnológicos disponíveis na máquina.

No modo de “Funcionamento em Malha Fechada”, apresentam-se duas demonstrações funcionais automatizadas, que permitem demonstrar as capacidades da máquina para a realização de funções ou operações, em que seja necessário um controlo flexível e energeticamente eficiente, sem deixar de ser preciso e rigoroso, no cumprimento de grandezas como posição, trajetória, velocidade ou força do atuador hidráulico, realizando para o efeito um controlo em malha fechada destas variáveis funcionais.

Ao longo deste capítulo são descritas as demonstrações e é feita uma apreciação geral sobre cada uma delas. Adicionalmente é feita uma breve descrição da interface gráfica desenvolvida para cada demonstração.

Assim, este capítulo encontra-se organizado da seguinte forma:

- **Funcionamento em Malha Aberta** – apresentação e descrição das demonstrações:
 - Movimento de Avanço com 2 velocidades;
 - Movimento Pulsante;
- **Funcionamento em Malha Fechada** – apresentação e descrição das demonstrações:
 - Controlo de Movimento, com perfil sinusoidal;
 - Controlo de Força;

5.1 Funcionamento em Malha Aberta

As demonstrações funcionais inseridas neste modo destinam-se à simulação de movimentos tipicamente industriais, utilizando os diversos meios tecnológicos disponíveis para o efeito, de forma a demonstrar as potencialidades da máquina. Para além disto, este modo de demonstração de funcionamento tem como objetivo, comprovar o correto funcionamento de todos os meios disponíveis na máquina, depois da renovação tecnológica efetuada. Neste modo de demonstração, o controlo das variáveis funcionais é realizado em malha aberta.

A primeira demonstração pretende simular um movimento característico de uma máquina de produção industrial, nomeadamente, uma prensa hidráulica que realize pequenos trabalhos de corte, ou estampagem, onde é necessário um movimento de avanço rápido de aproximação à peça, seguido de um movimento de avanço lento de trabalho.

Em relação à segunda demonstração, esta tem como principal objetivo simular um movimento típico de uma máquina de corte rápido industrial, onde a cadência de funcionamento é determinante para a eficácia da solução de automação.

Assim, este modo de funcionamento contempla as seguintes demonstrações:

- **Movimento de Avanço com 2 velocidades** – demonstração de um movimento comum em prensas industriais - movimento de avanço com 2 velocidades. Este movimento contempla uma velocidade rápida de aproximação, comutação de velocidade quando atingida uma certa posição e velocidade reduzida do atuador hidráulico até uma posição de avanço máximo;
- **Movimento Pulsante** – demonstração de um movimento pulsante, tipicamente utilizado em máquinas industriais de corte ou puncionagem, caraterizado por grande velocidade e grande cadência de movimentos, aos quais é associado um curso de reduzida dimensão;

Em ambas as demonstrações antes do início do movimento programado, o cilindro desloca-se sempre para uma posição superior de referência, no caso de estar numa outra qualquer posição do curso de trabalho. No fim do movimento programado, o cilindro desloca-se novamente para a mesma posição de referência.

5.1.1 Movimento de Avanço com 2 velocidades

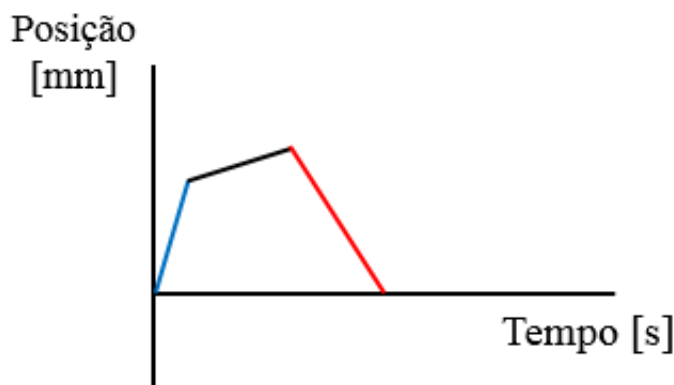
O sistema instalado permite ao atuador hidráulico realizar diversos perfis de movimento, com uma gama de velocidades alargada. Esta capacidade deve-se à instalação de um transdutor de posição, que permite a medição da posição do atuador hidráulico da prensa e de uma válvula direcional proporcional de elevada dinâmica, que permite o ajuste das velocidades de avanço e recuo, do atuador hidráulico. A instalação na prensa de um variador de frequência permite também ter disponível uma fonte de caudal variável, possibilitando o ajuste do caudal do sistema, de acordo com os perfis de velocidade pretendidos para o movimento.

O adequado ajuste da velocidade do motor elétrico, poderá permitir um consumo energético mais otimizado e, por conseguinte, um aumento da eficiência energética associada ao funcionamento durante a demonstração e a diminuição das perdas por energia térmica do que resulta um menor aquecimento do fluido hidráulico.

Assim, implementou-se uma demonstração denominada “Movimento de avanço com 2 velocidades”, que se destina a realizar sequências de movimentos do atuador hidráulico entre as posições de ponto morto superior e ponto morto inferior, com um perfil de avanço com 2 velocidades, sendo uma rápida e a outra lenta.

➤ Perfil de Movimento

Esta demonstração executa um movimento com um perfil como ilustrado na Figura 5.1. Como foi referido em cima, o controlo da velocidade do motor de acionamento da central hidráulica é realizado automaticamente, em função da necessidade de caudal associado às velocidades de movimento inseridas, otimizando, assim, a eficiência energética do sistema durante a demonstração.

**Legenda:**

— Movimento de Avanço Rápido

— Movimento de Avanço Lento

— Movimento de Recuo

Figura 5.1 - Perfil de movimento da demonstração - Movimento de Avanço com 2 velocidades

A demonstração é caracterizada por um movimento com velocidade de avanço rápida, seguido de um movimento com velocidade de avanço reduzida, até à posição de inversão de movimento e por fim, recuo a uma velocidade rápida.

No caso de ser detetada uma qualquer carga externa prévia à posição de comutação de velocidade, então a velocidade irá comutar de rápida para lenta, mesmo antes de atingir essa posição de comutação de velocidade.

Se, por outro lado, na fase de avanço lento, se identificar que o curso não atinge a posição final esperada, devido por exemplo, ao facto de a velocidade se ter anulado (por saturação de carga), então dá-se o recuo após um tempo limite (5 segundos).

As velocidades de avanço do atuador hidráulico (Rápida e Lenta) e as posições de comutação de velocidade e inversão do movimento são configuráveis pelo utilizador, dentro dos limites funcionais da máquina. O controlo destes parâmetros é sequencial e feito em malha aberta, por eventos, sendo portanto um controlo menos rigoroso quando comparado com um controlo em malha fechada. Assim, o controlo da velocidade do atuador é realizado a partir da aplicação de uma tensão na válvula direcional proporcional, com base na sua curva característica e de acordo com o diferencial de pressão associado. Para a determinação das posições associadas a este movimento é utilizada a característica do transdutor de posição linear.

Esta demonstração pode beneficiar das capacidades inerentes ao “Modo Manual”, nomeadamente o comando sensível a baixa velocidade para o posicionamento do atuador hidráulico e, assim, utilizar os valores obtidos para a realização desta demonstração funcional e comprovar o seu correto funcionamento.

➤ Interface Gráfica

Após a seleção desta demonstração, o utilizador terá disponível na área gráfica da HMI o ecrã representado na Figura 5.2.

| Movimento de Avanço com 2 Velocidades | | | | | |
|---------------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|---|
| Inserir | Velocidade | | Posição | | ✓ |
| | Avan. Ráp. | Avan. Len. | Pos. Com. | Pos. Inv. | |
| | 75 mm/s | 10 mm/s | 25 mm | 50 mm | |

| Painéis de Monitorização | Monitorização Geral | Comando de Movimento |
|--------------------------|---------------------|----------------------|
| Geral | Força: 0.00 kN | Iniciar |
| Atuador | Pressão: 0 bar | |
| Central Hid. | Posição: 2.8 mm | |

| Eventos | |
|---------|---|
| ◀ | 🏠 |

Figura 5.2 - Ecrã de caracterização da demonstração - Movimento de Avanço com 2 velocidades

Para o início da demonstração devem ser inseridas, na área respetiva, as velocidades de avanço (rápida e lenta) e as posições de comutação de velocidade e inversão de movimento. Após a seleção destes parâmetros é necessária a sua validação para que a secção de comando de movimento se encontre disponível e visível, possibilitando assim, o comando do movimento do atuador.

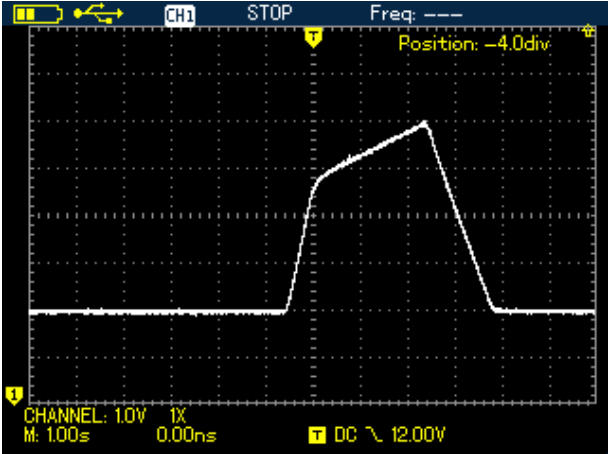
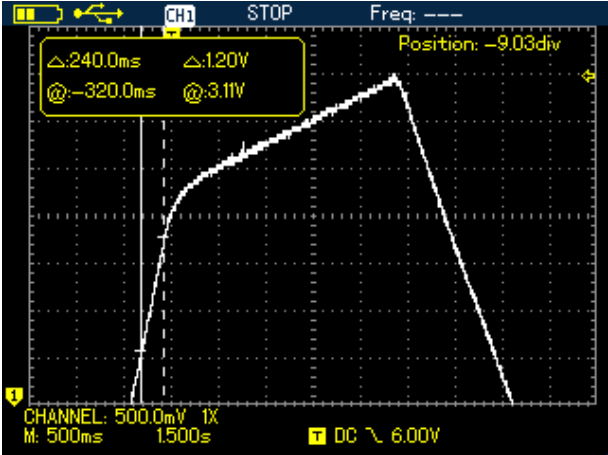
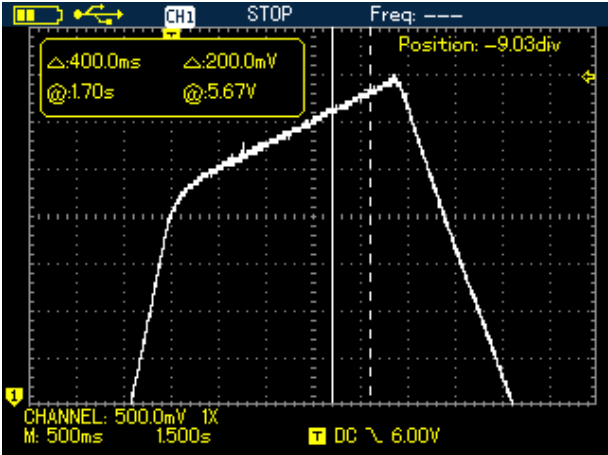
Iniciada a demonstração, através do botão “Iniciar”, a central hidráulica entra em funcionamento e a demonstração inicia-se com o movimento do atuador até à posição de referência, seguindo-se o início do movimento programado. No caso de este já se encontrar na posição de referência, o movimento programado é imediatamente iniciado.

Durante a execução do movimento, o utilizador pode monitorizar todo o processo através dos painéis de monitorização disponíveis. Finalizado o movimento, a central hidráulica é desligada.

➤ Testes e Resultados

Finalizada a programação e implementação da demonstração acima descrita, foram realizados vários testes de forma a comprovar o seu correto funcionamento e desempenho. Os resultados obtidos podem ser observados nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 - Resultados - Movimento de Avanço com 2 velocidades - Teste 1

| Parâmetros definidos | Resultado | Parâmetros obtidos/calculados |
|--|--|---|
| Velocidade de avanço rápido = 75 [mm/s] |  | Velocidade de avanço rápido = $\frac{1,2 \cdot 15}{0,240} = 75 \text{ [mm/s]}$ |
| Velocidade de avanço lento = 7,5 [mm/s] |  | Velocidade de avanço lento = $\frac{0,2 \cdot 15}{0,4} = 7,5 \text{ [mm/s]}$ |
| Posição de Comutação = 35 [mm] |  | Posição de Comutação = $2,44 \cdot 15 = 36,6 \text{ [mm]}$ |
| Posição de Inversão = 60 [mm] | | Posição de Inversão = $4,03 \cdot 15 = 60,45 \text{ [mm]}$ |

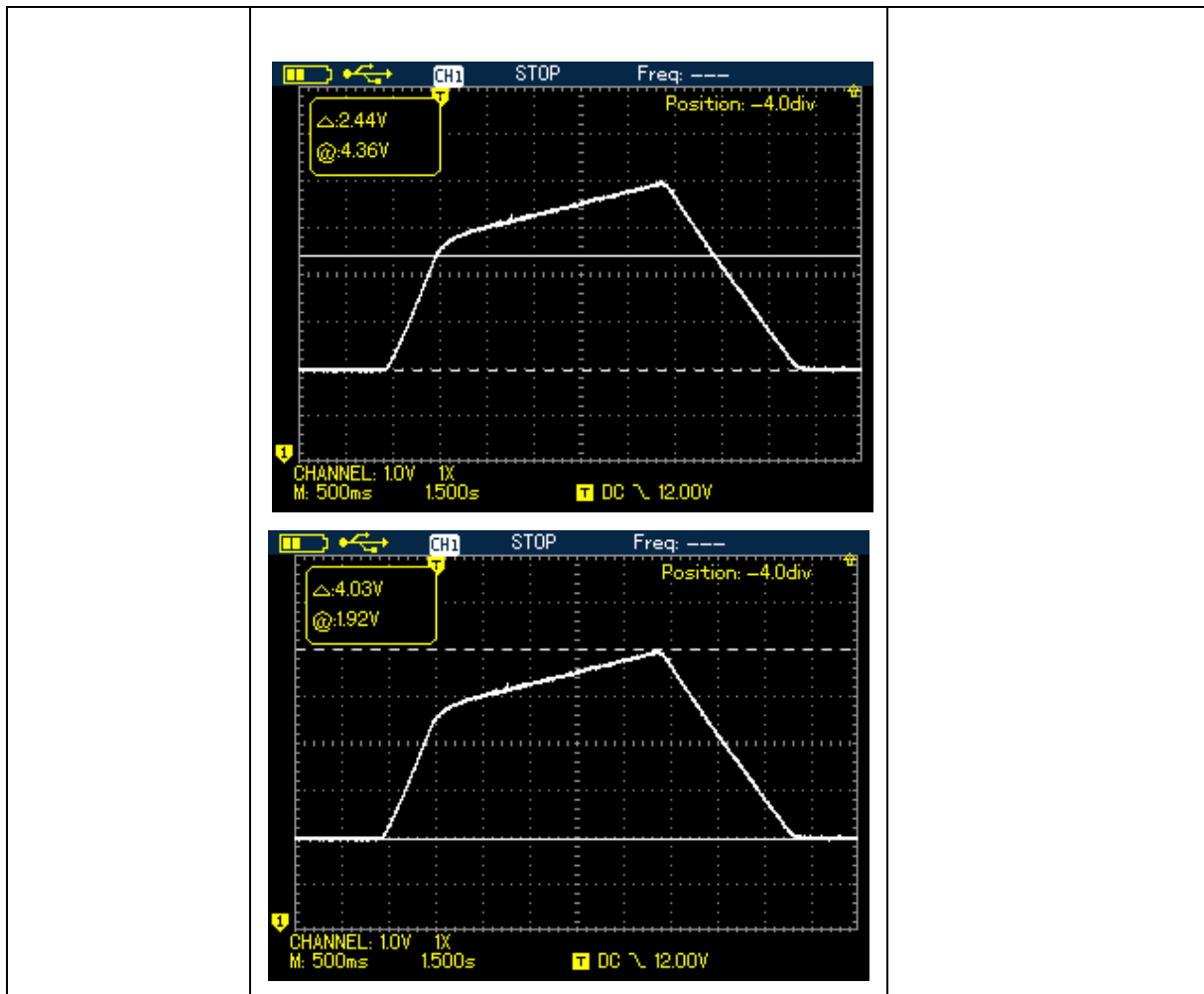
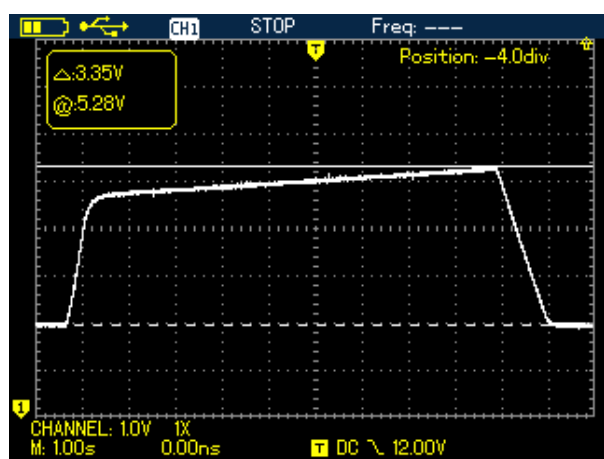
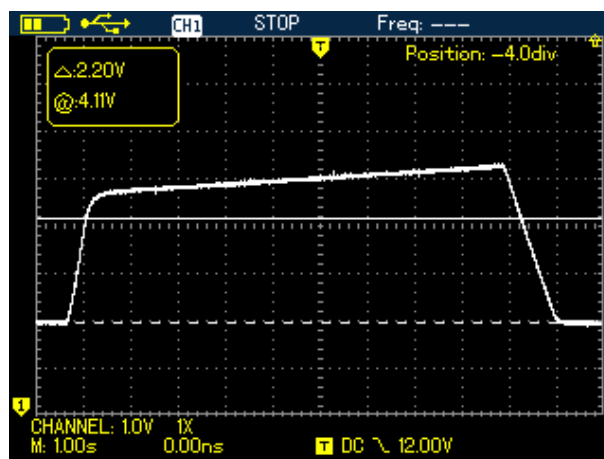
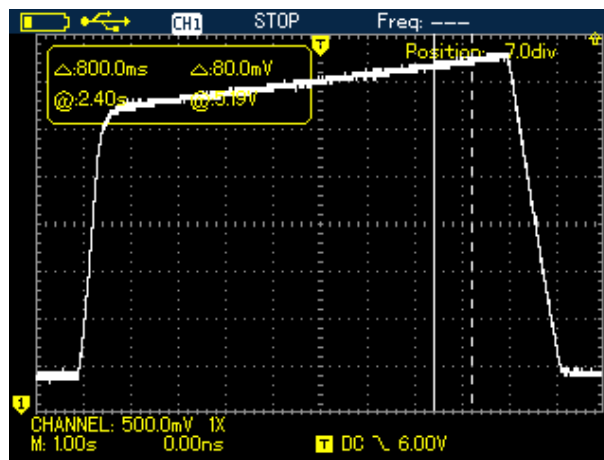
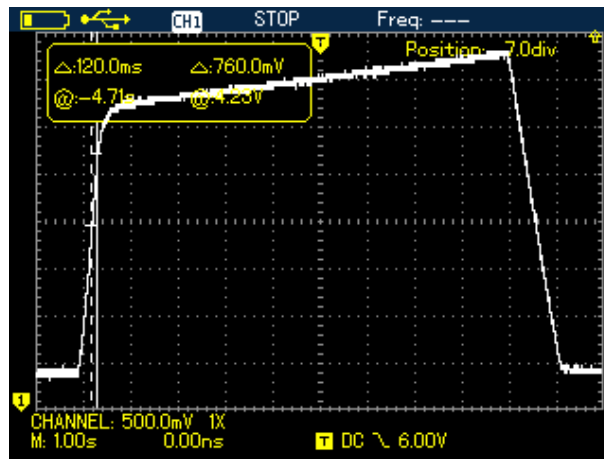


Tabela 5.2 - Resultados - Movimento de Avanço com 2 velocidades - Teste 2

| Parâmetros definidos | Resultado | Parâmetros obtidos/calculados |
|--|-----------|--|
| <p>Velocidade de avanço rápido = 100 [mm/s]</p> <p>Velocidade de avanço lento = 1 [mm/s]</p> | | <p>Velocidade de avanço rápido = $\frac{0,76 \times 15}{0,12} = 95 [\text{mm/s}]$</p> <p>Velocidade de avanço lento = $\frac{0,08 \times 15}{0,8} = 1,5 [\text{mm/s}]$</p> |

Posição de
Comutação =
30 [mm]

Posição de
Inversão =
50 [mm]



Posição de
Comutação =
 $2,20 * 15 =$
33 [mm]

Posição de Inversão =
 $3,35 * 15 =$
50,25 [mm]

Após a análise dos resultados, verifica-se que o perfil de movimento obtido está de acordo com o esperado. É possível visualizar os diferentes movimentos associados à demonstração, nomeadamente, o movimento de avanço rápido, o movimento de avanço lento e o movimento de recuo do atuador. Para além disso, é possível visualizar também a zona de comutação e inversão de movimento do atuador. Os parâmetros funcionais foram calculados com base nos resultados obtidos do osciloscópio, conjuntamente com o ganho do transdutor de posição linear (15 mm/V).

As posições de comutação e inversão de movimento calculadas são superiores às definidas inicialmente, como era de esperar, visto que o controlo destes parâmetros é realizado em malha aberta, por eventos. O facto de o cilindro já se encontrar em movimento durante a comutação de velocidades, traduz-se num “sobrecurso” associado, que será tanto maior quanto maior for a velocidade. O “sobrecurso” associado à posição de comutação de velocidade é superior ao “sobrecurso” associado à posição de inversão de movimento, visto que a velocidade do movimento, no primeiro caso, é muito superior à do segundo caso.

No que toca às velocidades de avanço rápido e lento calculadas, estas encontram-se aproximadamente iguais, sendo que poderá existir algum erro associado à leitura realizada no osciloscópio e ao facto de o controlo destas variáveis ser realizado em malha aberta.

5.1.2 Movimento Pulsante

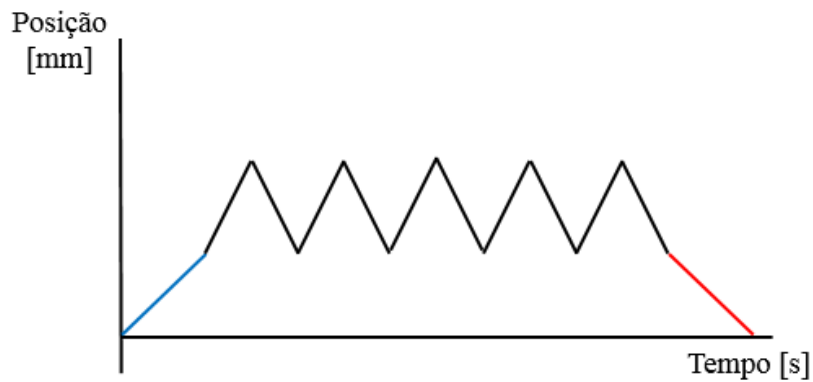
O movimento pulsante típico de máquinas punccionadoras é um movimento caracterizado por elevadas cadências de trabalho, ao qual estão associados componentes com pequenos tempos de resposta. Este movimento típico de uma máquina industrial foi objeto de estudo e originou a criação da presente demonstração.

A demonstração implementada designa-se “Movimento Pulsante” e consiste num movimento de vai e vem do atuador hidráulico, com uma cadência de movimento elevada, obtendo-se, assim, um movimento designado pulsante.

Este movimento beneficia da instalação, na prensa, de uma válvula direcional proporcional com pequeno tempo de resposta, de um autómato com uma elevada capacidade de processamento e de um acumulador hidráulico que confere uma dinâmica acrescida ao sistema, permitindo uma maior velocidade instantânea ao atuador hidráulico.

➤ Perfil de Movimento

Esta demonstração executa um movimento com perfil “Dente de Serra” como ilustrado na Figura 5.3, sendo caracterizado por elevadas cadências de trabalho.

**Legenda:**

- Movimento de Aproximação
- Movimento Pulsante
- Movimento de Recuo

Figura 5.3 - Perfil de movimento da demonstração - Movimento Pulsante

Contrariamente ao que sucede na demonstração anterior, esta demonstração não contempla a alteração por parte do utilizador de parâmetros funcionais.

Assim, o movimento programado é caracterizado por um número total de ciclos igual a 20 e por um período de funcionamento de 1 [s]. Nesta demonstração é executado tanto o movimento de subida como o de descida em cerca de 25 [ms], correspondente a uma cadência de 20 golpes por segundo. Devido ao facto de o movimento de subida e descida ser controlado de forma temporal, a amplitude inerente ao movimento será aparentemente fixa e correspondente ao movimento programado.

O controlo destes parâmetros é sequencial e feito em malha aberta, sendo portanto, um controlo menos rigoroso, quando comparado com um controlo em malha fechada.

➤ Interface Gráfica

Após a seleção desta demonstração, o utilizador terá disponível na área gráfica da HMI o ecrã representado na Figura 5.4.

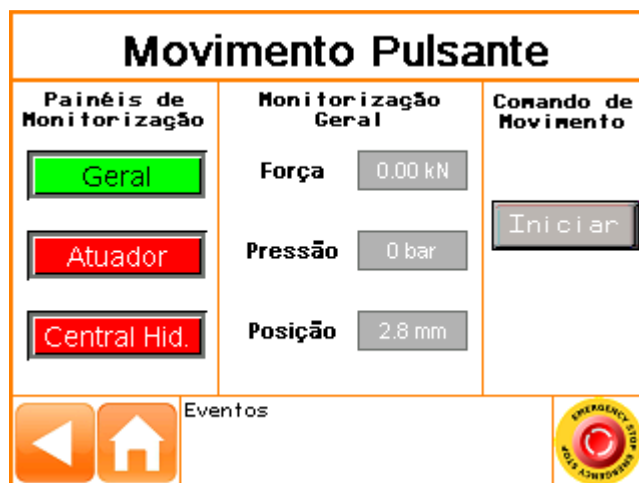


Figura 5.4 - Ecrã de caracterização da demonstração - Movimento Pulsante

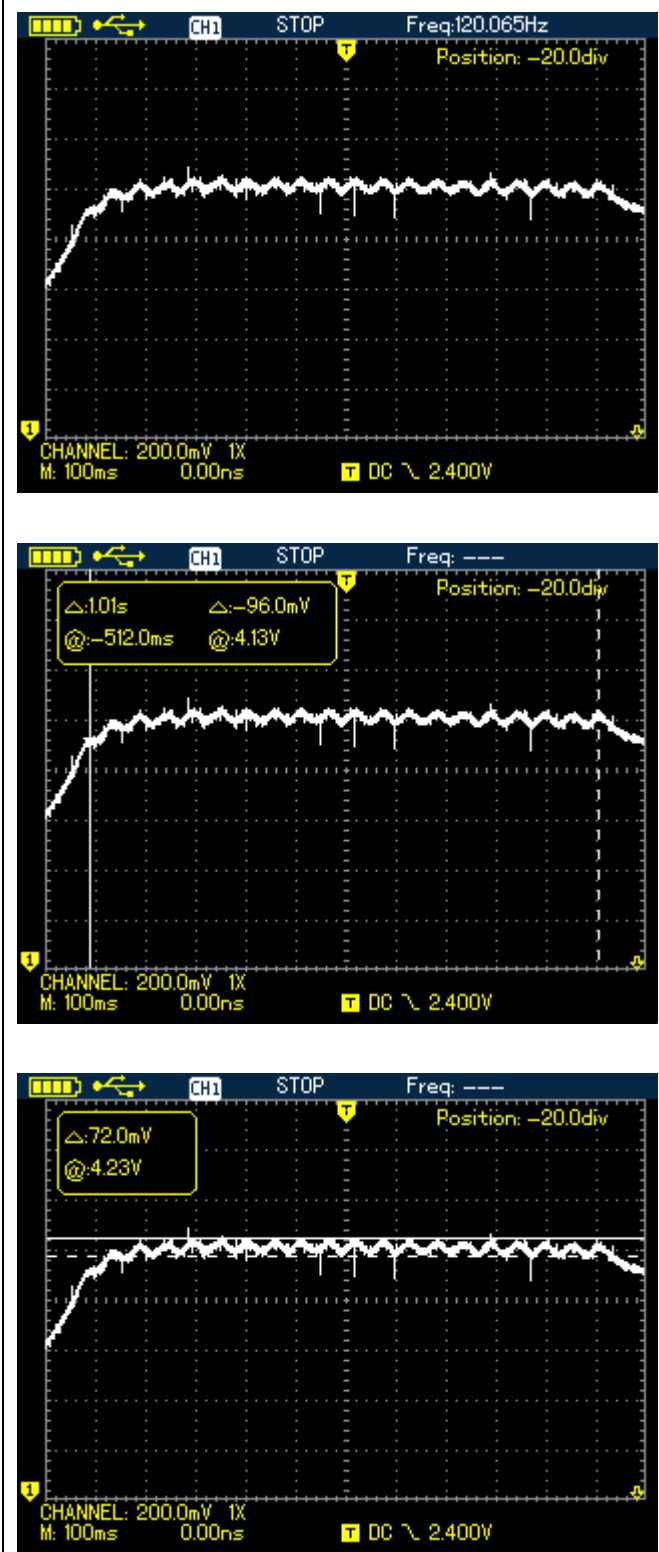
Após a seleção do botão “Iniciar” a central hidráulica entra em funcionamento e a demonstração inicia-se com o movimento do atuador até à posição de referência, seguindo-se o início do movimento de descida até uma posição distanciada de aproximadamente 35 [mm] do detetor de fim de curso superior, em volta da qual é executado o movimento pulsante. No caso de o atuador já se encontrar na posição de referência, o movimento programado é imediatamente iniciado.

Durante a execução do movimento, o utilizador pode monitorizar todo o processo através dos painéis de monitorização disponíveis. Finalizado o movimento pulsante, o atuador recolhe automaticamente até à posição de referência e a central hidráulica é desligada.

➤ Testes e Resultados

Finalizada a programação e implementação da demonstração acima descrita, foram realizados vários testes de forma a comprovar o seu correto funcionamento e desempenho. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Resultados - Movimento Pulsante

| Resultado | Parâmetros obtidos/calculados |
|--|---|
|  | <p>Período ≈ 1 [s]</p> <p>Amplitude = $0,072 \cdot 15 = 1,08$ [mm]</p> <p>Número de ciclos = 20</p> |

Após a análise dos resultados, verifica-se que o perfil de movimento associado a este tipo de movimento é do tipo “Dente de Serra”, como esperado. Tal como já foi referido, os parâmetros funcionais foram calculados com base nos resultados obtidos do osciloscópio, conjuntamente com o ganho do transdutor de posição linear (15 mm/V). O período obtido foi de aproximadamente 1 [s], com um número total de ciclos igual a 20, correspondendo estes valores ao movimento programado e implementado. A amplitude obtida consequente da definição destes parâmetros funcionais foi de aproximadamente 1 [mm]. Como é visível, no início do movimento pulsante, existe alguma instabilidade associada devido essencialmente à transição do movimento de aproximação para o movimento programado, visto que se tratam de movimentos com características muito diferentes.

5.2 Funcionamento em Malha Fechada

Os modos de demonstração implementados na presente dissertação caracterizam-se por um nível de complexidade crescente e, como tal, por último procedeu-se à implementação de um modo de funcionamento em malha fechada, que contempla duas demonstrações, nas quais o controlo dos parâmetros funcionais em estudo é realizado em malha fechada.

O modo de funcionamento em “Malha Fechada” tem como principal objetivo demonstrar as novas capacidades da máquina, depois da remodelação sofrida, nomeadamente ao nível do controlo de posição, velocidade e força. Assim, pretende-se através deste modo de demonstração, mostrar as potencialidades da máquina para a execução de diversas aplicações ou operações, quer sejam didáticas ou industriais, onde parâmetros como posição, velocidade e força sejam importantes para o seu correto desempenho.

As demonstrações inseridas neste modo de demonstração de funcionamento caracterizam-se por um funcionamento automático. O utilizador pode comandar o início e fim de cada demonstração, através dos botões de seleção correspondentes e os respetivos parâmetros funcionais. No caso de a demonstração ultrapassar o número de ciclos definido ou o tempo limite de atividade, esta é finalizada automaticamente.

Assim, este modo de demonstração de funcionamento contempla as seguintes demonstrações:

- **Controlo de Movimento, com perfil sinusoidal** – demonstração de um movimento com perfil sinusoidal através do controlo de posição do atuador hidráulico, em malha fechada;
- **Controlo de Força** – demonstração de um ensaio com controlo de força de compressão do atuador hidráulico, em malha fechada;

Em ambas as demonstrações, antes do início do movimento programado, o cilindro desloca-se sempre para uma posição superior de referência, no caso de estar numa outra qualquer posição do curso de trabalho. No fim do movimento programado, o cilindro desloca-se novamente para a mesma posição de referência.

5.2.1 Controlo de Movimento com perfil sinusoidal

O controlo de movimento do atuador hidráulico pode ser realizado em malha aberta, como demonstrado no capítulo anterior, sendo que quando realizado dessa forma, apresenta algumas dificuldades em satisfazer com qualidade o perfil de movimento definido.

No caso de se querer um controlo com maior rigor, este deve ser realizado em malha fechada. Com esta demonstração pretende-se mostrar uma solução de controlo em malha fechada, na qual se escolheu um movimento do tipo sinusoidal, visto se tratar de um movimento mais complexo e difícil de realizar.

Para a realização desta demonstração pretende-se tirar partido da instalação na prensa de um transdutor de posição e de uma válvula direcional proporcional, que permitiram o controlo da posição e velocidade do atuador hidráulico, respetivamente. A instalação na prensa de um variador de frequência permite também ter disponível uma fonte de caudal variável, possibilitando o ajuste do caudal do sistema, de acordo com os perfis de velocidade associados ao movimento.

O adequado ajuste da velocidade do motor elétrico, poderá permitir um consumo energético mais otimizado e, por conseguinte, um aumento da eficiência energética associada ao funcionamento durante a demonstração e a diminuição das perdas por energia térmica, do que resulta um menor aquecimento do fluido hidráulico.

Assim, implementou-se uma demonstração denominada “Controlo de Movimento com perfil Sinusoidal”, que se destina a realizar um movimento com um perfil de movimento sinusoidal, com controlo da posição em malha fechada.

➤ Perfil de Movimento

Esta demonstração executa um movimento com perfil sinusoidal como ilustrado na Figura 5.5. Como foi referido em cima, o controlo da velocidade do motor é realizado automaticamente, em função da necessidade de caudal associado às velocidades inerentes ao movimento inserido.

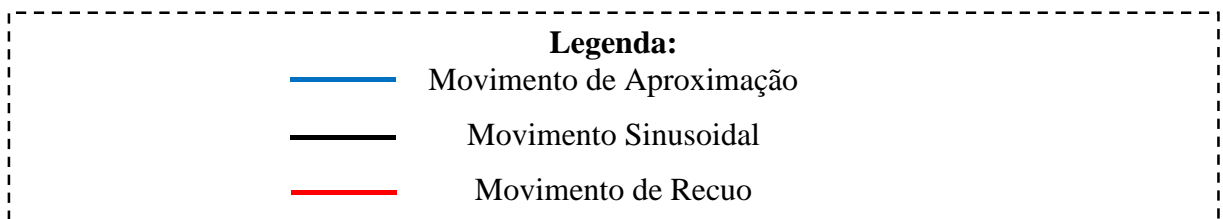
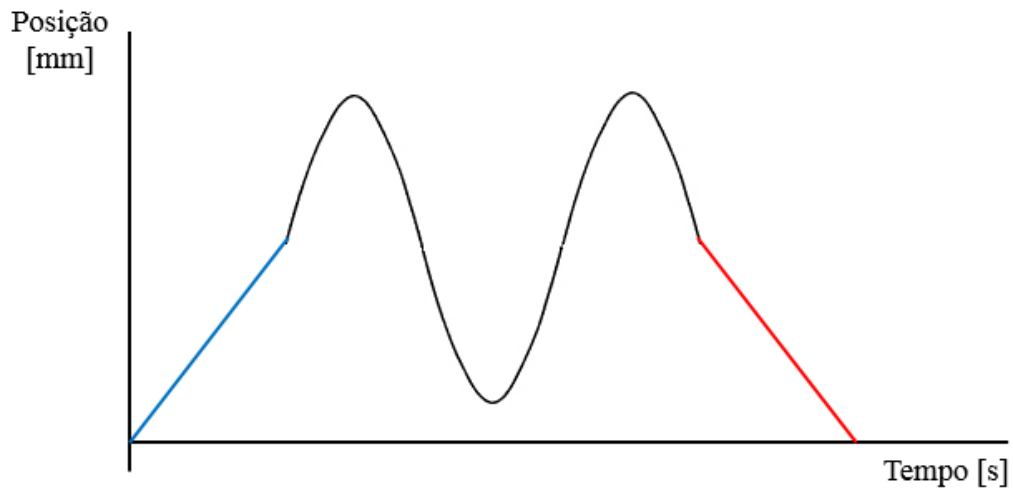


Figura 5.5 - Perfil de movimento da demonstração - Controlo de Movimento com perfil sinusoidal

Este tipo de movimento é tipicamente caracterizado por uma frequência e por uma amplitude, sendo descrito pelas equações 5.1 ou 5.2.

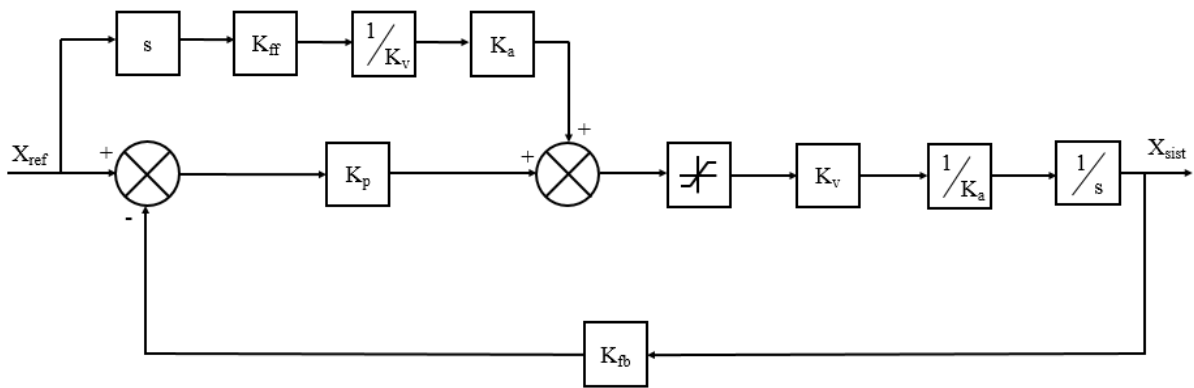
$$X = A * \cos(wt) \quad (5.1)$$

ou

$$X = A * \sin(wt) \quad (5.2)$$

Assim, o utilizador poderá configurar na interface gráfica a frequência e a amplitude desejadas para o movimento e o número total de ciclos do movimento, dentro dos limites funcionais da máquina.

De forma a ser possível controlar a posição do atuador hidráulico com rigor implementou-se um controlador em malha fechada. O diagrama de blocos que caracteriza este sistema de controlo apresenta-se na Figura 5.6.

**Legenda:**

X_{ref} – posição de referência / X_{sist} – posição do atuador / K_{ff} – ganho de *feedforward*
 K_p – ganho proporcional / K_{fb} – ganho de *feedback* / K_v – ganho de caudal da válvula
 K_a – ganho do atuador

Figura 5.6 - Diagrama de blocos do controle de posição do atuador hidráulico

Como se pode observar no diagrama de blocos acima apresentado, foi introduzida uma malha de controlo por *feedforward*, de referência de velocidade, e uma malha de controlo por *feedback*, usando como elemento de feedback o transdutor de posição linear absoluto. A ação de controlo introduzida foi do tipo proporcional (P).

Nesta demonstração pretende-se realizar um movimento sinusoidal e como tal, a referência de posição é dada por uma função sinusoidal. A derivada desta função corresponde à velocidade pretendida para o movimento que constitui, a menos de uma constante, o sinal a aplicar à válvula direcional proporcional de modo a controlar, em malha aberta, a velocidade do movimento do atuador. Para garantir que o comando à válvula é realizado dentro dos limites definidos, sujeitou-se o sinal de saída a uma saturação, que não permite que o sinal produzido exceda $\pm 10V$ (100% do sinal de comando da válvula).

➤ Interface Gráfica

Após a seleção desta demonstração, o utilizador terá disponível na área gráfica da HMI o ecrã representado na Figura 5.7.

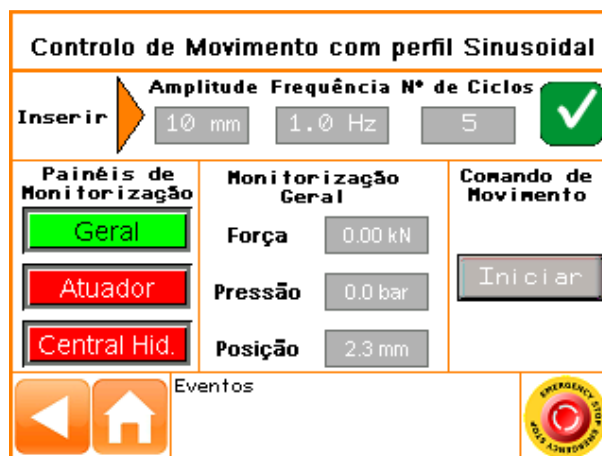


Figura 5.7 - Ecrã de caraterização da demonstração - Controlo de Movimento com perfil sinusoidal

Para o início da demonstração deve ser inserido na área respetiva:

- a amplitude de movimento do atuador;
- a frequência pretendida para o movimento;
- o número de ciclos a realizar;

Após a seleção destes parâmetros é necessária a sua validação para que a secção de comando de movimento se encontre disponível e visível, possibilitando assim, o comando do atuador. No entanto, caso os parâmetros selecionados sejam incompatíveis com os parâmetros limites funcionais da máquina é apresentada uma mensagem de erro ao utilizador, na secção de comando de movimento.

Iniciada a demonstração, através do botão “Iniciar”, a central hidráulica entra em funcionamento e a demonstração inicia-se com o movimento até à posição de referência, seguindo-se o início do movimento de descida até uma posição distanciada de aproximadamente 35 [mm] do detetor de fim de curso superior, em volta da qual é executado o movimento sinusoidal. No caso de o atuador já se encontrar na posição de referência, o movimento programado é imediatamente iniciado.

Durante a execução do movimento, o utilizador pode monitorizar todo o processo através dos painéis de monitorização disponíveis.

A demonstração pode ser finalizada a qualquer momento pelo utilizador através do botão “Finalizar”, ou quando o número de ciclos definido é atingido, sendo que nesse caso o ensaio é finalizado automaticamente. Finalizado o movimento sinusoidal, o atuador recolhe automaticamente até à posição de referência e a central hidráulica é desligada.

➤ Testes e Resultados

Finalizada a programação e implementação da demonstração acima descrita, foram realizados vários testes de forma a comprovar o seu correto funcionamento e desempenho. Os resultados obtidos podem ser observados nas Tabelas 5.4 e 5.5.

Tabela 5.4 - Resultados - Controle de Movimento com perfil sinusoidal - Teste 1

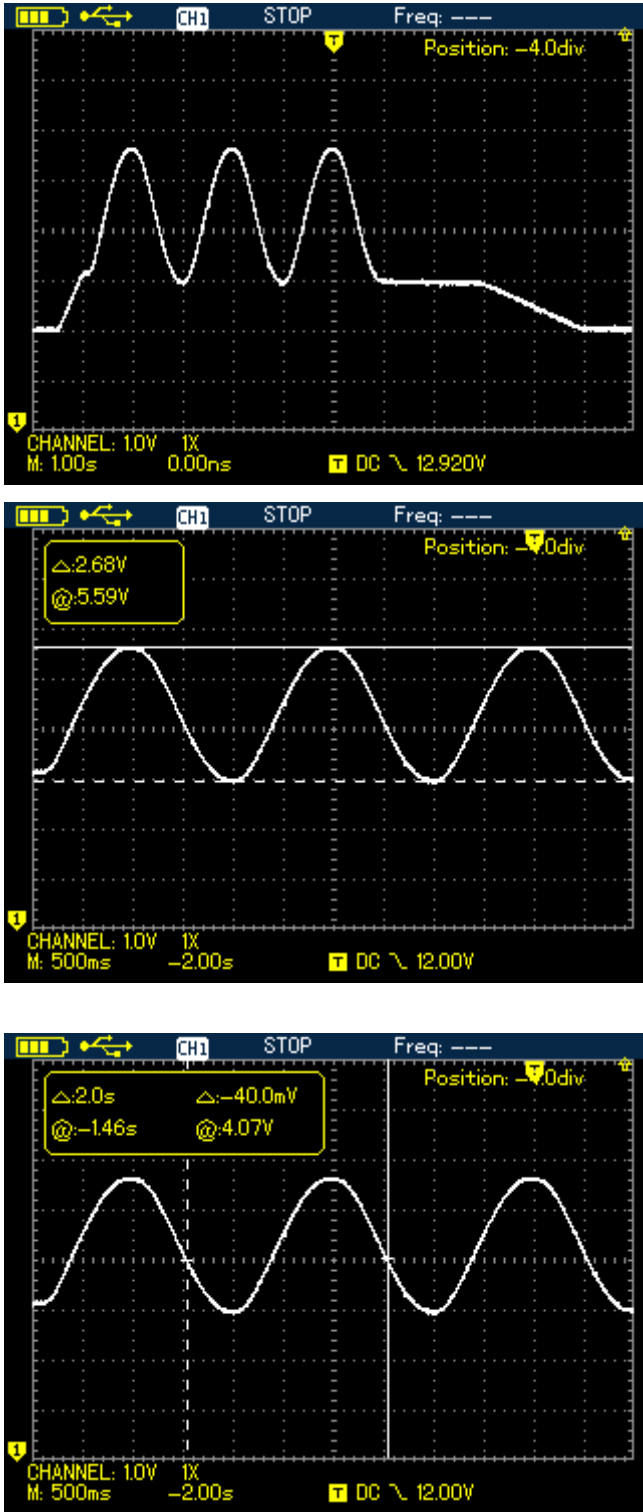
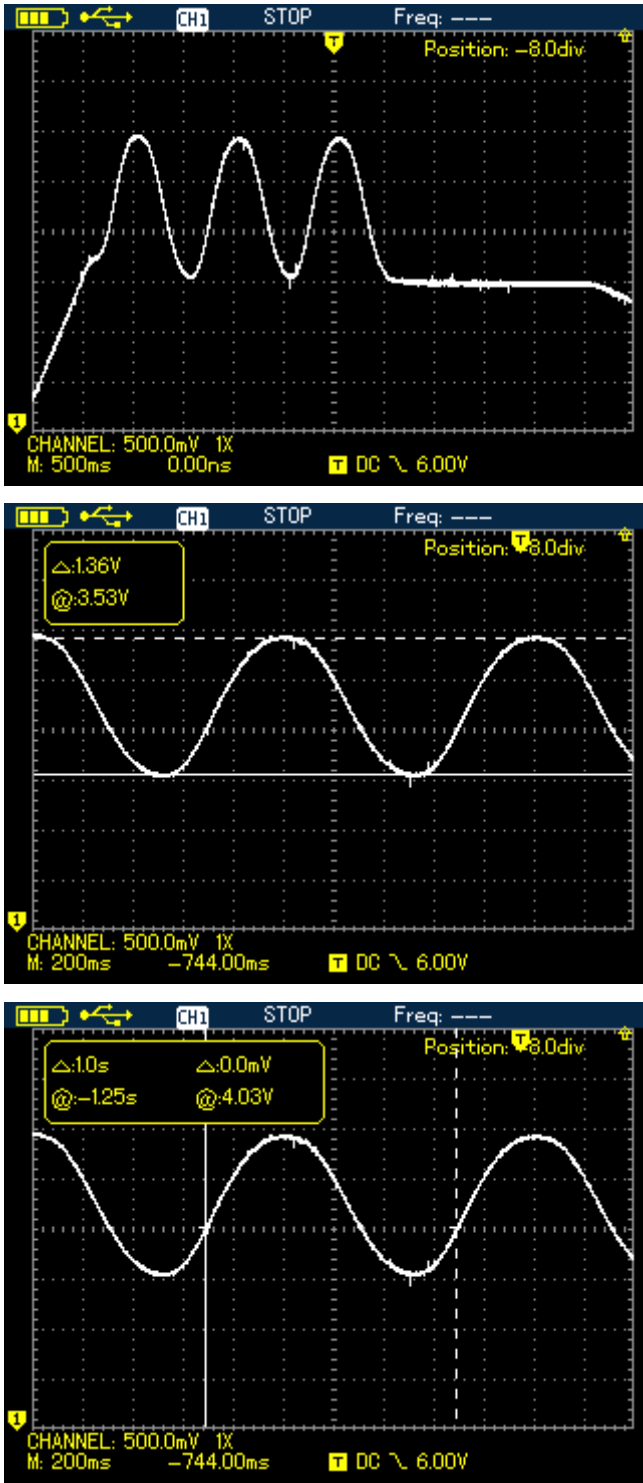
| Parâmetros definidos | Resultado | Parâmetros obtidos/calculados |
|--|--|---|
| <p>Frequência = 0,5 [Hz]</p> <p>Amplitude = 20 [mm]</p> <p>Número de Ciclos = 3</p> |  <p>The figure consists of three oscilloscope screenshots. The first screenshot shows a sinusoidal waveform with a peak-to-peak voltage of 2.68V and a period of 5.59V. The second screenshot shows the same waveform with a peak-to-peak voltage of 2.0V and a period of 1.46s. The third screenshot shows the waveform with a peak-to-peak voltage of 4.07V and a period of 2.0s. The waveforms are displayed on a grid with a vertical scale of 1.0V and a horizontal scale of 1X.</p> | <p>Frequência = $\frac{1}{2}$ = 0,5 [Hz]</p> <p>Amplitude = $\frac{2,68 \times 15}{2} = 20,1$ [mm]</p> <p>Número de Ciclos = 3</p> |

Tabela 5.5 - Resultados - Controlo de Movimento com perfil sinusoidal - Teste 2

| Parâmetros definidos | Resultado | Parâmetros obtidos/calculados |
|--|--|--|
| <p>Frequência = 1 [Hz]</p> <p>Amplitude = 10 [mm]</p> <p>Número de Ciclos = 3</p> |  <p>The figure consists of three oscilloscope screenshots. The first screenshot shows a sinusoidal waveform with a frequency of 1 Hz. The second screenshot shows a zoomed-in view of the waveform with a peak-to-peak voltage of 1.36V and a peak voltage of 3.53V. The third screenshot shows a zoomed-in view of the waveform with a period of 1.0s and a peak voltage of 4.03V.</p> | <p>Frequência = $\frac{1}{1}$ = 1 [Hz]</p> <p>Amplitude = $\frac{1,36 \times 15}{2} = 10,2 [\text{mm}]$</p> <p>Número de Ciclos = 3</p> |

Após a análise dos resultados, verifica-se que o perfil de movimento é do tipo sinusoidal, como era esperado. É possível visualizar os diferentes movimentos associados à demonstração, nomeadamente, o movimento de aproximação, o movimento sinusoidal e o movimento de recuo do atuador. Tal como já foi referido, os parâmetros funcionais foram calculados com base nos resultados obtidos do osciloscópio, conjuntamente com o ganho do transdutor de posição linear (15 mm/V).

Em relação aos parâmetros funcionais obtidos, estes encontram-se muito próximos dos valores inicialmente definidos, como era esperado, visto que o controlo destes é realizado em malha fechada, sendo portanto, um controlo mais rigoroso.

A amplitude de movimento foi calculada com base no resultado obtido do osciloscópio e com o respetivo ganho do transdutor de posição linear (15 mm/V).

5.2.2 Controlo de Força

O controlo de força de um atuador hidráulico é sempre um tipo de aplicação que apresenta dificuldade de ser realizada com rigor e estabilidade. Quando requerido com pouco rigor, pode ser realizado com comando em malha aberta. Na presente demonstração, pretende-se realizar um controlo em malha fechada, beneficiando da instalação na prensa de uma célula de carga, de uma válvula direcional proporcional e de uma válvula limitadora de pressão proporcional.

O sistema instalado permite ao atuador hidráulico uma capacidade de força de compressão variável, embora certamente a partir de um valor mínimo de força. De forma a se tirar proveito dessa capacidade, desenvolveu-se uma demonstração designada “Controlo de Força”, que consiste num ensaio no qual se consegue um controlo da força exercida pelo atuador hidráulico, desde 1 a 20 [kN].

O controlo de força é sempre dependente do tipo de carga resistente sobre a qual se pretende exercer a carga. Numa prensa, o perfil de movimento assenta sempre numa fase inicial de movimento que é de aproximação, sem qualquer carga, seguido de uma segunda fase do movimento na qual uma carga resistente é atacada, como são os casos de trabalhos de corte, estampagem ou embutidura de materiais.

➤ Perfil de Movimento

Esta demonstração executa um movimento inicial sem carga, com velocidade constante e baixa pressão, para aproximação à peça a trabalhar. Após o contacto com a peça, que pressupõe uma oposição mínima, passa a executar um movimento com carga constante na qual

se faz um controlo de força do atuador. Este limite máximo de força é configurável na interface gráfica.

Dependendo da peça a trabalhar, os ensaios podem ser com velocidade de avanço “nula”, no caso de a peça a trabalhar ser de um material rígido, ou com velocidade de avanço “não nula”, no caso de a peça ser de um material que evidencia cedência ou fluência (material flexível). Estes dois limites de característica de carga podem ser seleccionáveis na interface gráfica.

A seleção de um material rígido pressupõe que o controlo de força se faz a uma velocidade aproximadamente nula. No caso da seleção de um material com fluência pressupõe que o controlo de força se efetua a uma velocidade não nula.

O perfil de velocidade associado ao movimento anteriormente explicado pode ser visto em maior detalhe na Figura 5.8.

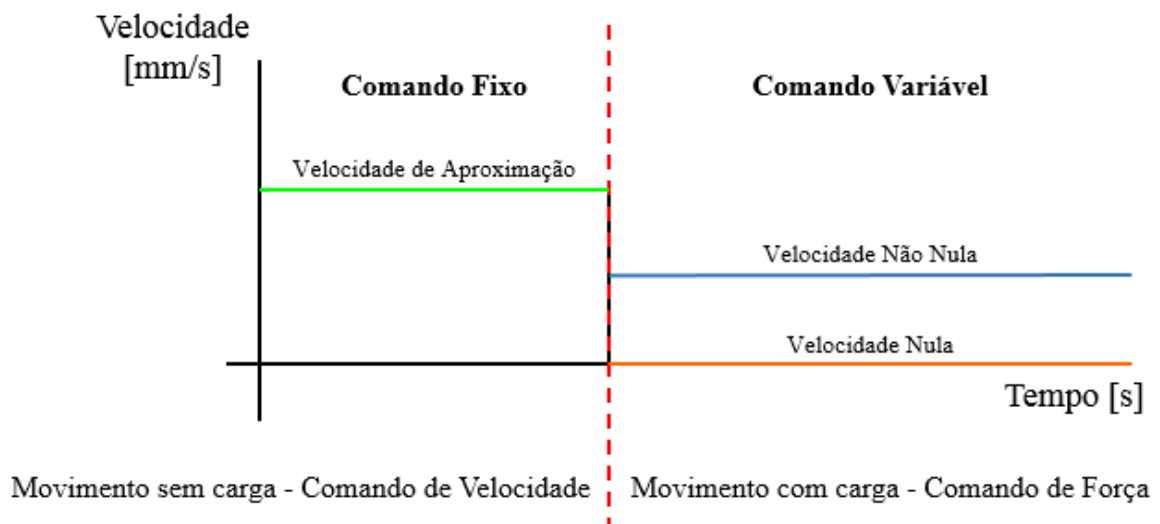


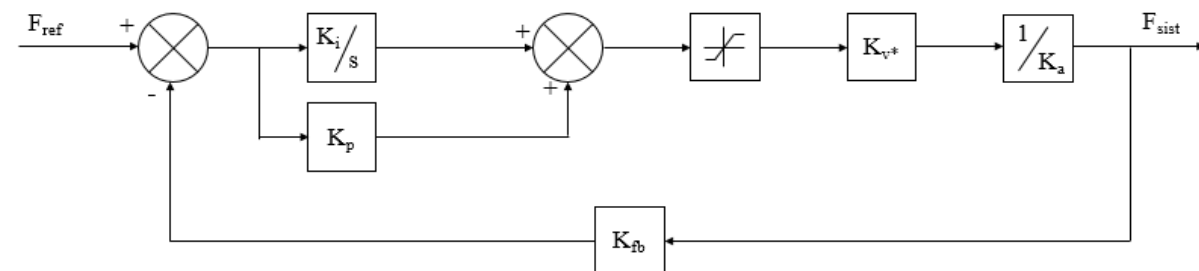
Figura 5.8 - Perfil de velocidade da demonstração - Controlo de Força

Em ambos os movimentos a realizar durante o ensaio existe uma necessidade diminuta de caudal. Como tal, ajustou-se o caudal máximo disponível para 30 [%] do caudal máximo da bomba, correspondendo este valor a uma velocidade de rotação do motor de aproximadamente 500 [rpm]. Esta alteração permite que o consumo energético do motor seja menor e, portanto, haja, um aumento da eficiência energética do sistema.

Após o início do movimento com carga, no qual se faz o controlo da força de compressão do atuador hidráulico, a pressão do sistema é regulada através da força de referência inserida pelo utilizador. Nesse momento, é aplicada uma tensão na válvula limitadora de pressão proporcional, baseada na sua curva característica, obtendo-se assim, uma pressão no sistema superior à necessária para a realização do movimento com carga. Assim, o atuador terá

uma capacidade de força marginalmente superior à necessária para o ensaio, na ordem de 5 a 10 [%], sendo que apenas é necessário realizar o controlo da força de compressão do atuador.

De forma a ser possível controlar a força de compressão realizada pelo atuador hidráulico com rigor e precisão, implementou-se um controlador em malha fechada. O diagrama de blocos que caracteriza este sistema de controlo apresenta-se na Figura 5.9.



Legenda:

F_{ref} – força de referência / F_{sist} – força do sistema / K_i – ganho integral
 K_p – ganho proporcional / K_{fb} – ganho de *feedback* / K_{v*} – ganho de pressão da válvula
 K_a – ganho do atuador

Figura 5.9 - Diagrama de blocos do controlo de força de compressão do atuador

Como se pode observar na malha de controlo acima apresentada, foi introduzida uma ação de controlo proporcional e integral (PI), que assegura um erro nulo a referências de forças constantes. O elemento de feedback utilizado na malha de controlo por feedback foi a célula e o respetivo amplificador de carga. De forma a reduzir a ação integral, quando o sistema está saturado, introduziu-se um bloco de *anti-windup*.

A operação de controlo de força, tipicamente, seria realizada utilizando a válvula limitadora de pressão. No entanto, devido ao comando desta ser pouco rigoroso e aproveitando as características da válvula direcional proporcional, realizou-se um controlo em que o elemento de comando utilizado foi a válvula direcional proporcional.

O comando desta válvula é realizado, para um ensaio de um material rígido, dentro da zona de recobrimento, pois o ensaio decorrerá com velocidade nula. No caso, de um ensaio de um material que evidencia fluência, este comando decorrerá fora da zona de recobrimento, visto que o ensaio terá uma velocidade associada não nula. Para garantir que o comando é realizado dentro dos limites definidos, sujeitou-se o sinal de saída a uma saturação, que não permite que o sinal produzido exceda os intervalos $[-1.8; +1.8V]$ e $[-3; +3 V]$ (respetivamente 18 [%] e 30 [%] do sinal máximo de comando da válvula). Desta diferente configuração de carga resultará, ou uma ausência clara de movimento ou uma limitação clara de velocidade.

Através do comando da válvula direcional proporcional é possível induzir pequenas variações de pressão através da variação do estrangulamento das linhas P-A e A-T, através do movimento da gaveta aquando do comando da válvula. O facto de a zona de recobrimento desta válvula ser substancialmente grande, aproximadamente 18 [%], traduz-se numa grande vantagem ao nível da sua controlabilidade para este tipo de aplicação.

➤ Interface Gráfica

Após a seleção desta demonstração, o utilizador terá disponível na área gráfica da HMI o ecrã representado na Figura 5.10.

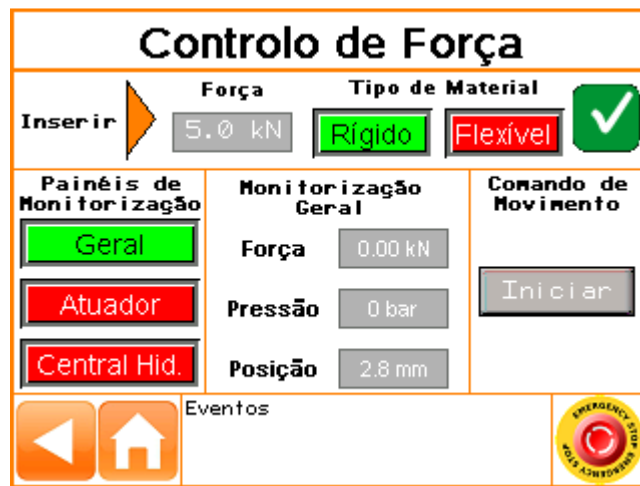


Figura 5.10 - Ecrã de caracterização da demonstração - Controlo de Força

Para o início da demonstração deve ser inserida na área respetiva:

- Força requerida;
- Tipo de material a ensaiar;

Após a seleção destes parâmetros é necessária a sua validação para que a secção de comando de movimento se encontre disponível e visível possibilitando assim, o comando do atuador.

Iniciada a demonstração, através do botão “Iniciar”, a central hidráulica entra em funcionamento e a demonstração inicia-se com o movimento até à posição de referência, seguindo-se o início do movimento de aproximação à peça a trabalhar. Após o contacto do atuador com a peça a ensaiar, inicia-se o ensaio com controlo de força.

Após o início da demonstração e no caso de o atuador já se encontrar na posição de referência, o movimento é iniciado com o movimento de aproximação à peça a trabalhar. Na situação de o atuador não encontrar qualquer peça, ou seja, sem nenhuma oposição ao

movimento, este realiza 1 ciclo de movimento (movimento de avanço mais movimento de recuo), finalizando esse movimento quando atinge a posição de referência.

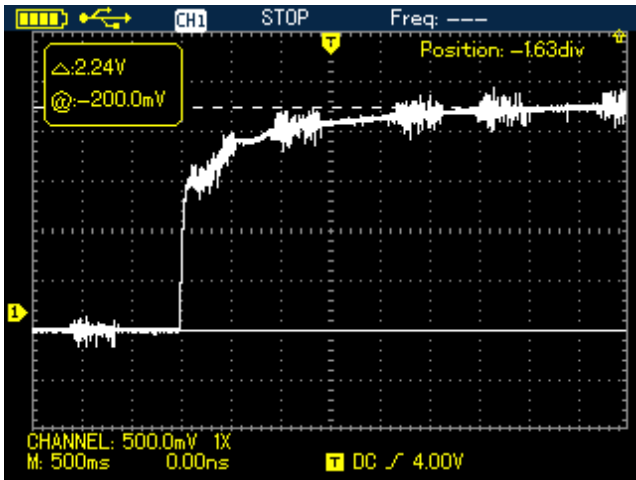
Durante a execução do ensaio, o utilizador pode monitorizar todo o processo através dos painéis de monitorização disponíveis, nomeadamente a força de compressão do atuador.

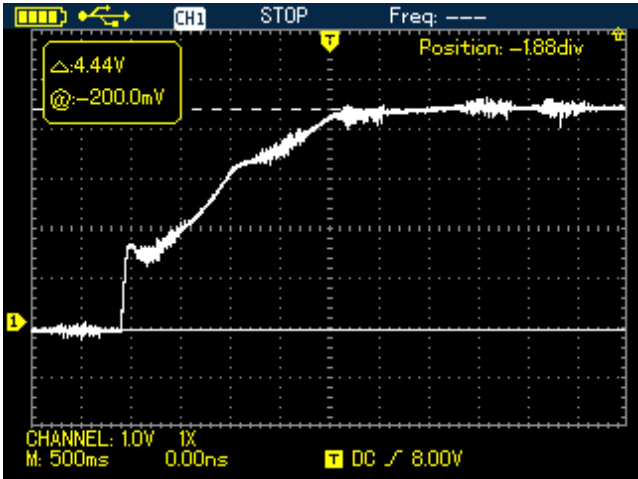
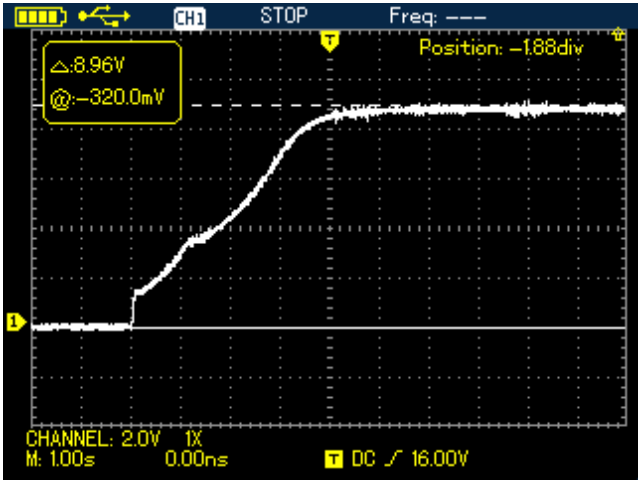
O ensaio pode ser finalizado a qualquer momento pelo utilizador através do botão “Finalizar”. No caso de se exceder o tempo limite estipulado para o ensaio (1 minuto) ou por qualquer motivo se atingir um estado de excesso de carga (*Overload*), o ensaio é finalizado automaticamente. Finalizado o ensaio, o atuador recolhe automaticamente até à posição de referência e a central hidráulica é desligada.

➤ Testes e Resultados

Finalizada a programação e implementação da demonstração acima descrita, foram realizados vários testes de forma a comprovar o seu correto funcionamento e desempenho. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Resultados - Controlo de Força

| Parâmetros definidos | Resultado | Parâmetros obtidos/calculados |
|---|--|--|
| <p>Força = 5 [kN]</p> <p>Tipo de Material: Rígido</p> |  | <p>Força = $2,3 \times 2,24$ = 5,152 [kN]</p> |

| | | |
|--|---|--|
| <p>Força = 10 [kN]</p> <p>Tipo de Material: Rígido</p> |  | <p>$\text{Força} = 2,3 \cdot 4,44$ $= 10,212 \text{ [kN]}$</p> |
| <p>Força = 20 [kN]</p> <p>Tipo de Material: Rígido</p> |  | <p>$\text{Força} = 2,3 \cdot 8,96$ $= 20,608 \text{ [kN]}$</p> |

O parâmetro funcional em análise e estudo, a força do atuador hidráulico, foi calculado com base no resultado obtido do osciloscópio e com o respetivo ganho do amplificador da célula de carga (2,3 kN/V). Adicionalmente durante o ensaio foi possível acompanhar a sua evolução através do painel de monitorização Geral.

Analisando os resultados, verifica-se um controlo preciso e rigoroso da força de compressão do atuador hidráulico, sem ocorrência de *overshoot* e com um *settling time* para a força máxima de aproximadamente 5 segundos.

6 Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

O principal objetivo desta dissertação consistiu em automatizar a Prensa Hidráulica de Laboratório PHC 1003, tornando a máquina tecnologicamente mais evoluída.

Inicialmente, realizou-se um estudo prévio à prensa hidráulica com o objetivo de compreender o seu funcionamento e avaliar todos os componentes e órgãos presentes ao nível elétrico, hidráulico e informático.

A atualização tecnológica consistiu na atualização dos meios de comando e controlo, instrumentação e segurança, através da utilização de componentes e sistemas mais modernos.

A inclusão de um variador de frequência para o comando e controlo do motor elétrico conduziu a uma melhoria significativa ao nível da eficiência energética da máquina. A utilização de válvulas do tipo proporcional, conjuntamente com o variador de frequência, permitiu otimizar a gestão da energia do sistema e, assim, obter uma máquina muito mais eficiente do que era inicialmente.

Devido às alterações realizadas nos diversos meios disponíveis na máquina esta possui novas capacidades no que toca a controlo de posição, velocidade e força, executando movimentos com grande capacidade dinâmica.

Para complementar a automatização da prensa desenvolveu-se um *software* de controlo, que permite comandar e monitorizar toda a máquina, no qual se inclui a gestão da central hidráulica e o movimento do atuador hidráulico.

No que concerne aos diferentes tipos de utilização da máquina, esta foi preparada para a execução de dois tipos de funcionamento: Funcionamento Normal e Manutenção. O funcionamento normal da máquina contempla o modo manual, sendo este o modo de funcionamento mais simples e destinado ao comando do movimento do atuador hidráulico, entre os dois detetores de fim de curso. Adicionalmente, foram implementadas quatro demonstrações funcionais com níveis de complexidade diferentes e automatização crescente, de modo a comprovar o sucesso da solução de automação implementada na máquina.

As demonstrações desenvolvidas mostraram também as capacidades e potencialidades da máquina, quer para a realização de aplicações didáticas, quer industriais. Assim, encontra-se disponível uma máquina com grande flexibilidade e capacidade dinâmica para a realização de diversas operações/aplicações.

Em conclusão, obteve-se uma máquina completamente funcional e atualizada do ponto de vista tecnológico, constituindo-se uma mais-valia para o laboratório de Óleo-hidráulica onde se encontra instalada.

6.2 Propostas para Trabalhos Futuros

Após concluída a automatização da Prensa estão reunidas todas as condições para que sejam exploradas em detalhe todas as suas potencialidades numa segunda fase de trabalho.

No que toca ao capítulo da segurança, sugere-se a finalização do sistema de segurança proposto, constituído pelas barreiras de segurança fotoelétricas e pela botoneira de emergência já instalada. Além da instalação das barreiras de segurança é necessário a conexão dos dispositivos de segurança com o módulo de segurança do autómato instalado e a interligação com a programação desenvolvida.

Sendo uma máquina com uma elevada quantidade e diversidade de instrumentação, é bastante conveniente a criação de uma área de manutenção com o objetivo de aceder aos diversos elementos da máquina (sensores, transdutores, entre outros), de modo a conhecer as suas características. Além disso, sugere-se também numa próxima fase do trabalho, a possibilidade de calibração destes elementos de medição.

As demonstrações programadas e implementadas demonstram as novas capacidades da máquina, após as alterações sofridas. Em trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de aplicações didáticas ou industriais específicas para este tipo de máquina, como por exemplo, o corte de chapa, no qual se pode tirar proveito do alimentador de chapa anteriormente instalado. No caso de a máquina começar a operar durante períodos de tempo particularmente longos, sugere-se a ligação do permutador óleo/água presente na central hidráulica, assim como a respetiva válvula de comando.

A instalação do variador de frequência e a utilização de válvulas de tipo proporcional constituíram um grande passo para o aumento da eficiência energética desta máquina. Como tal, sugere-se a continuação da exploração da temática da eficiência energética de modo a reconhecer que se dispõe de uma máquina eficiente, utilizando para isso, todas as potencialidades do autómato instalado.

Assim, o autómato teria um controlo dinâmico sobre todas as variáveis de funcionamento, realizando uma autoanálise durante o funcionamento de modo a ajustar todos os parâmetros funcionais, para a realização de uma aplicação/operação, sem prejudicar o desempenho durante o funcionamento, mas com uma otimização da eficiência energética.

Por fim, no que toca à comunicação sugere-se a integração de um sistema de supervisão, para que seja possível a monitorização remota da máquina, através de um *webserver*. Este sistema permitiria um acompanhamento em tempo real permitindo o acesso a todos os dados e variáveis de funcionamento, de forma a acompanhar permanentemente as operações realizadas na máquina.

Referências

- [1] A. B. d. Rocha e J. F. Duarte, Tecnologia Mecânica - Pressas - Volume 3, FEUP: INEGI.
- [2] F. M. Freitas, “Automatização de uma Prensa Hidráulica com Recurso a Instrumentação Virtual,” FEUP, Porto, 2006/2007.
- [3] F. Freitas, “Elementos de Hidráulica Proporcional,” Hidromática, Soluções de Automação, Porto, 1998.
- [4] BOSCH, “Servo solenoid valves LVDT–DC”.
- [5] Vickers, “Proportional Valves,” 2002.
- [6] Vickers, “Power Plugs for Proportional Valves,” 1996.
- [7] National Instruments, “CompactRIO”.
- [8] Schneider Electric, “O essencial da Detecção,” 2010.
- [9] FAGOR - FAGOR AUTOMATION, “Linear and angular encoders”.
- [10] KISTLER, “Force - Load Washers”.
- [11] KISTLER, “Measure & Analyze – MCA”.
- [12] AEP transducers, “TP14 - Data Sheet”.
- [13] KMK Sensortechnik, “Technical Data: PT series of piezoresistive pressure sensors with built in amplifier - Absolute pressure sensor”.
- [14] Schneider Electric - Telemecanique, “PHASEO - Power Supplies ABL7 - Catalog,” 2004.
- [15] PReletronics, “SWITCHMODE POWER SUPPLY - Type 2222”.
- [16] Parker, “Direct Operated Proportional DC Valve - Catalogue,” 2015.
- [17] Rexroth Bosch, “Proportional pressure relief valve, pilot operated,” 2005.
- [18] F. Freitas, “Apontamentos de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos,” FEUP, Porto, 2012.
- [19] OMRON, “VARISPEED E7 - Variable Torque Frequency Inverter - USER’S MANUAL”.
- [20] MTS SENSORS, “Temposonics Linear-Position Sensors - Product Data Sheet - E-Series, Models EP/EL,” 2014.
- [21] Schneider Electric, “TM251MESC - Product data sheet (Characteristics),” 2015.
- [22] Schneider Electric, *Modicon TM3 Expansion Modules - Programming Guide*, 2014.
- [23] Schneider Electric, *Modicon TM3 Analog I/O Modules - Hardware Guide*, 2014.
- [24] Schneider Electric, *Modicon TM3 Digital I/O Modules - Hardware Guide*, 2014.
- [25] Schneider Electric, “TM3AI4 module TM3 - 4 analog inputs - Product data sheet,” 2015.
- [26] Schneider Electric, “TM3AI2H module TM3 - 2 analog inputs high resolution - Product datasheet,” 2015.
- [27] Schneider Electric, “TM3AQ4 module TM3 - 4 analog outputs - Product data sheet”.
- [28] Schneider Electric, “TM3DM24R module TM3 - 24 IO relays - Product data sheet,” 2015.
- [29] Schneider Electric, “TM3SAFL5R - Product data sheet,” 2015.
- [30] Schneider Electric, *Modicon TM3 Safety Modules - Hardware Guide*, 2014.
- [31] Schneider Electric, *SoMachine - Programming Guide*, 2010.
- [32] Schneider Electric, “HMISTU855 - Product data sheet,” 2015.
- [33] Schneider Electric, *Modicon M251 Logic Controller - Programming Guide*, 2014.
- [34] Schneider Electric, *Modicon M251 Logic Controller - Hardware Guide*, 2015.
- [35] Schneider Electric, *Magelis HMISTU655/855 - User Manual*, 2014.

ANEXO A - Listagem de Sinais

| Módulo Entradas Digitais – TM3 DM24R | |
|---|---|
| Entrada Digital | Descrição |
| I0 | Monitorização da botoneira de emergência |
| I1 | Monitorização do comando interno da fonte de energia |
| I2 | Monitorização de funcionamento do variador de frequência |
| I3 | Monitorização de funcionamento do motor elétrico |
| I4 | Monitorização de avaria do variador de frequência |
| I5 | Monitorização do detetor de fim de curso inferior |
| I6 | Monitorização do detetor de fim de curso superior |
| I7 | Monitorização do estado de excesso de carga (<i>Overload</i>) |
| I8 | Monitorização do comando externo da fonte de energia |
| I9 | Monitorização da fonte PS1 – Potência |
| I10 | Monitorização da fonte PS1 – Digital |
| I11 | Monitorização da fonte PS2 – Analógica |
| I12 | - |
| I13 | - |
| I14 | - |
| I15 | - |

| Módulo Saídas Digitais – TM3 DM24R | |
|---|---|
| Saída Digital | Descrição |
| Q0 | Atuação da válvula direcional proporcional |
| Q1 | Atuação da válvula limitadora de pressão proporcional |
| Q2 | Atuação do variador de frequência |
| Q3 | Atuação do motor elétrico |
| Q4 | Atuação da válvula de refrigeração |
| Q5 | Atuação do relé (amplificador de carga) - RA |
| Q6 | Atuação do relé de segurança – RS1 |
| Q7 | - |

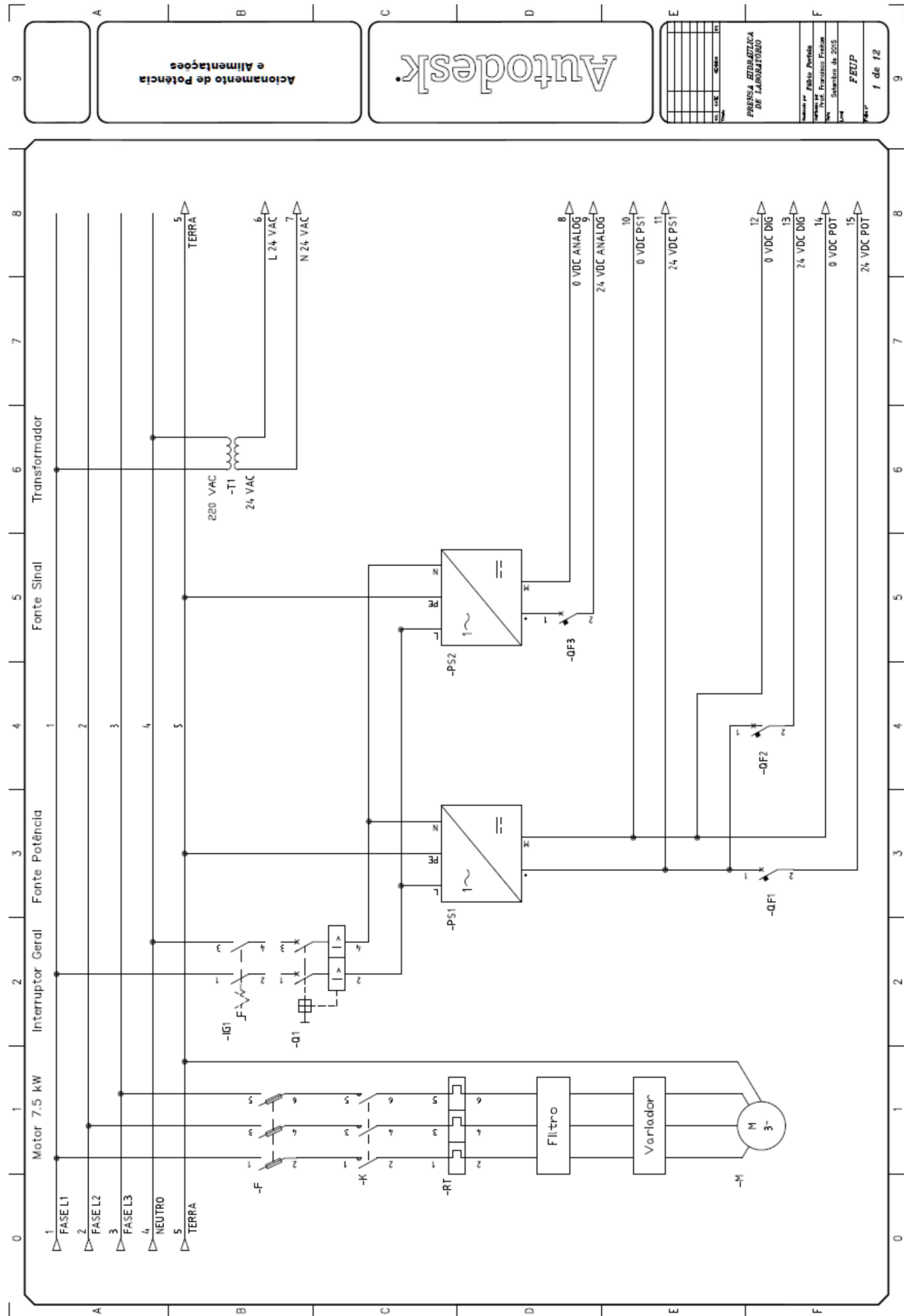
| Módulo Entradas Analógicas – TM3AI4 (1) | |
|--|--|
| Entrada Analógica | Descrição |
| I0 ⁺ I0 ⁻ | Leitura do transdutor de pressão TP1 |
| I1 ⁺ I1 ⁻ | Leitura do transdutor de pressão TPP |
| I2 ⁺ I2 ⁻ | Leitura do transdutor de pressão TP2 |
| I3 ⁺ I3 ⁻ | Leitura do transdutor de temperatura TT1 |

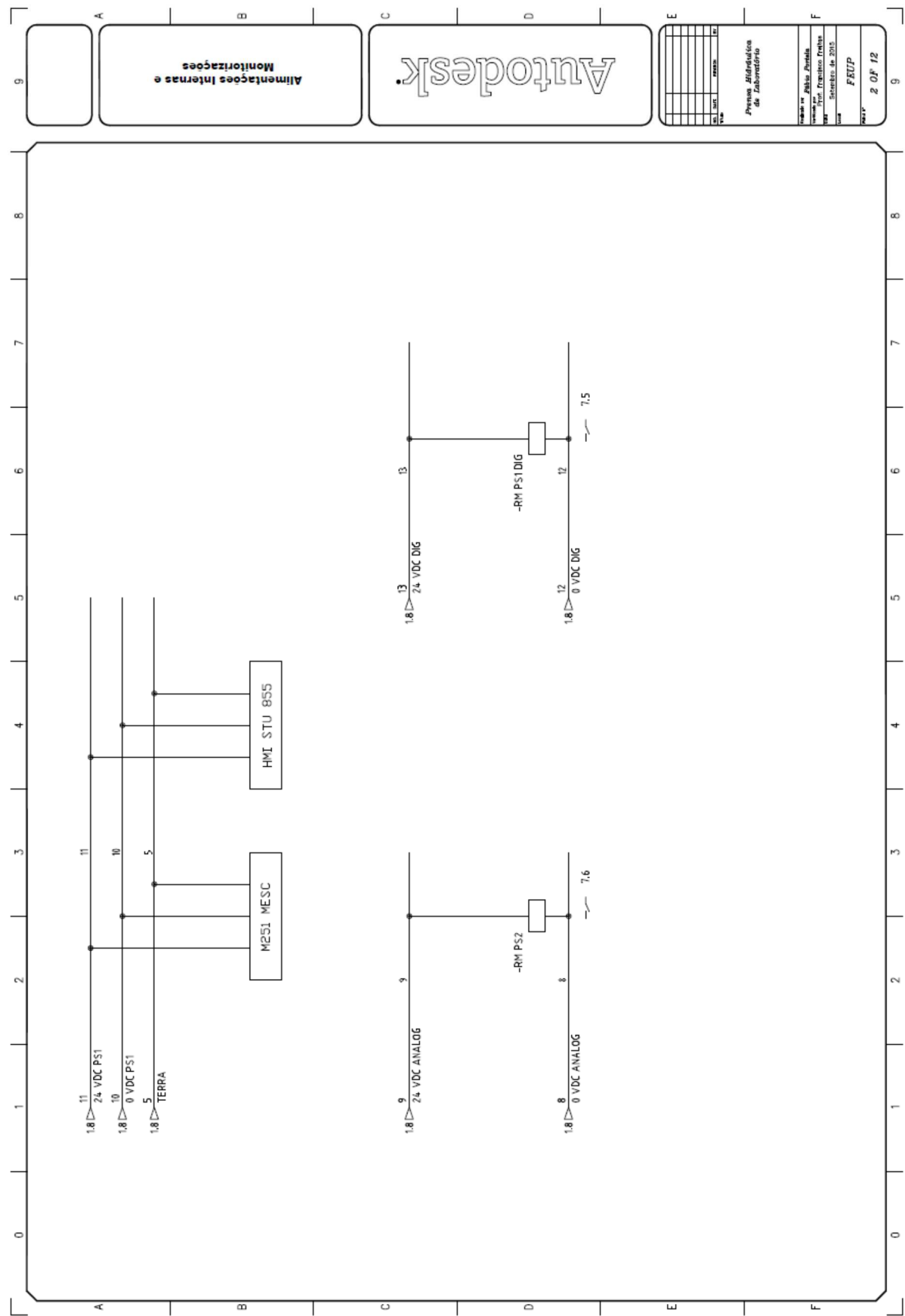
| Módulo Entradas Analógicas – TM3AI4 (2) | |
|--|---|
| Entrada Analógica | Descrição |
| I0 ⁺ I0 ⁻ | Leitura do amplificador da célula de carga |
| I1 ⁺ I1 ⁻ | Leitura da válvula direcional proporcional |
| I2 ⁺ I2 ⁻ | Leitura da potência consumida pelo motor elétrico |
| I3 ⁺ I3 ⁻ | Leitura da frequência do motor elétrico |

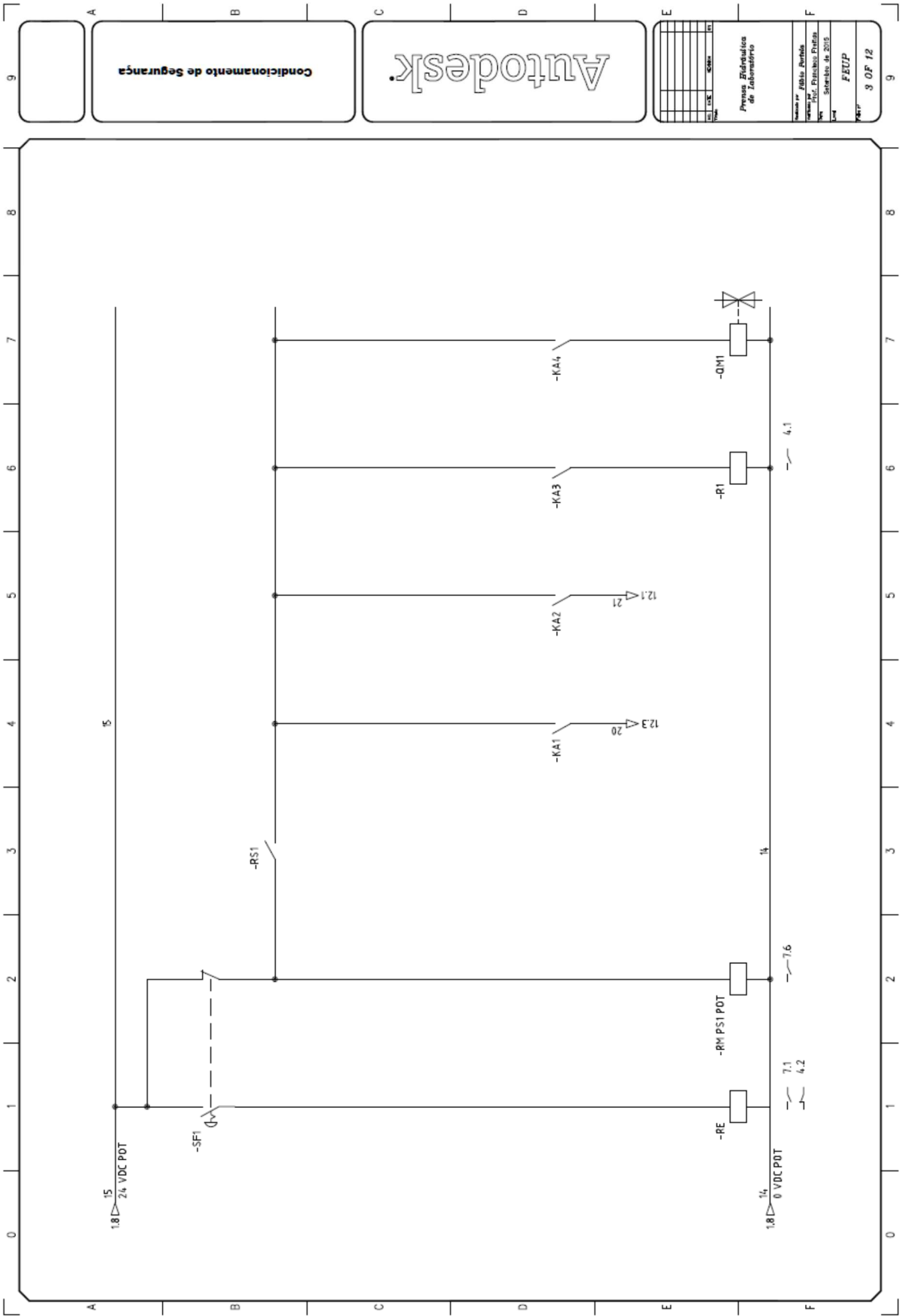
| Módulo Entradas Analógicas – TM3AI2H | |
|---|----------------------------------|
| Entrada Analógica | Descrição |
| I0 ⁺ I0 ⁻ | Leitura do transdutor de posição |
| I1 ⁺ I1 ⁻ | - |

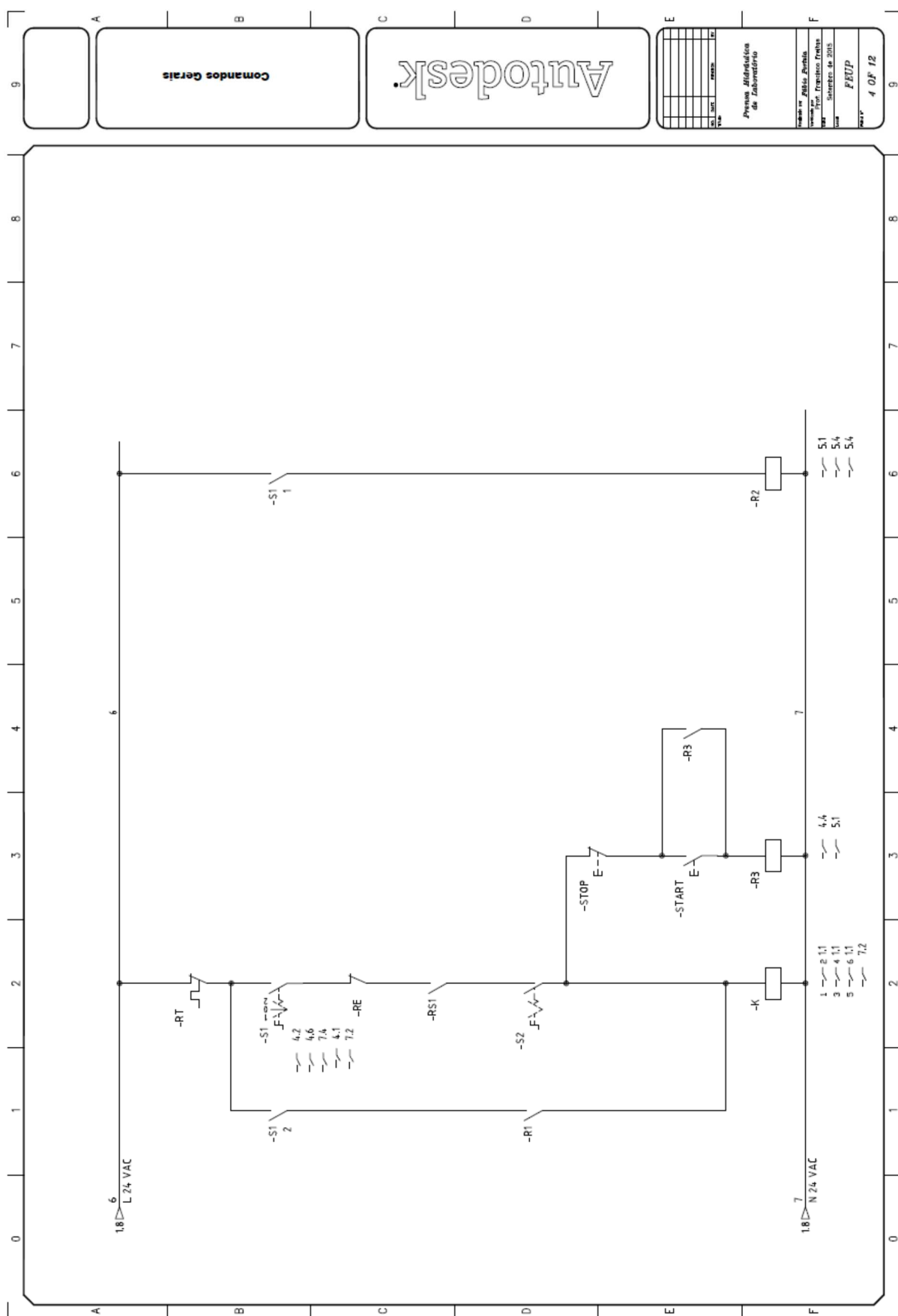
| Módulo Saídas Analógicas – TM3AQ4 | |
|--|--|
| Saída Analógica | Descrição |
| Q0 ⁺ Q0 ⁻ | Comando da válvula direcional proporcional |
| Q1 ⁺ Q1 ⁻ | Comando da válvula limitadora proporcional |
| Q2 ⁺ Q2 ⁻ | Comando da frequência do motor elétrico |
| Q3 ⁺ Q3 ⁻ | - |

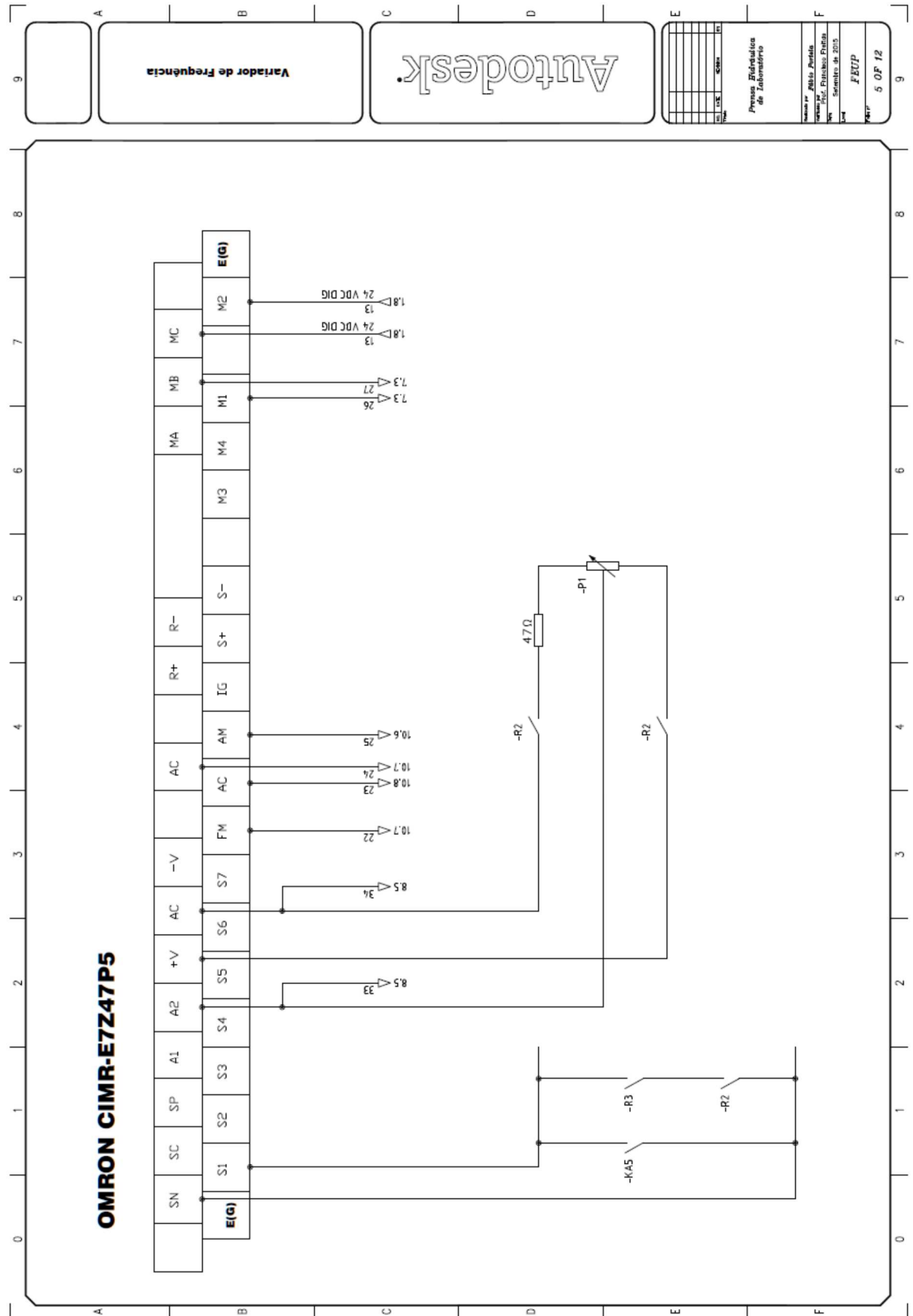
ANEXO B - Esquemas Elétricos

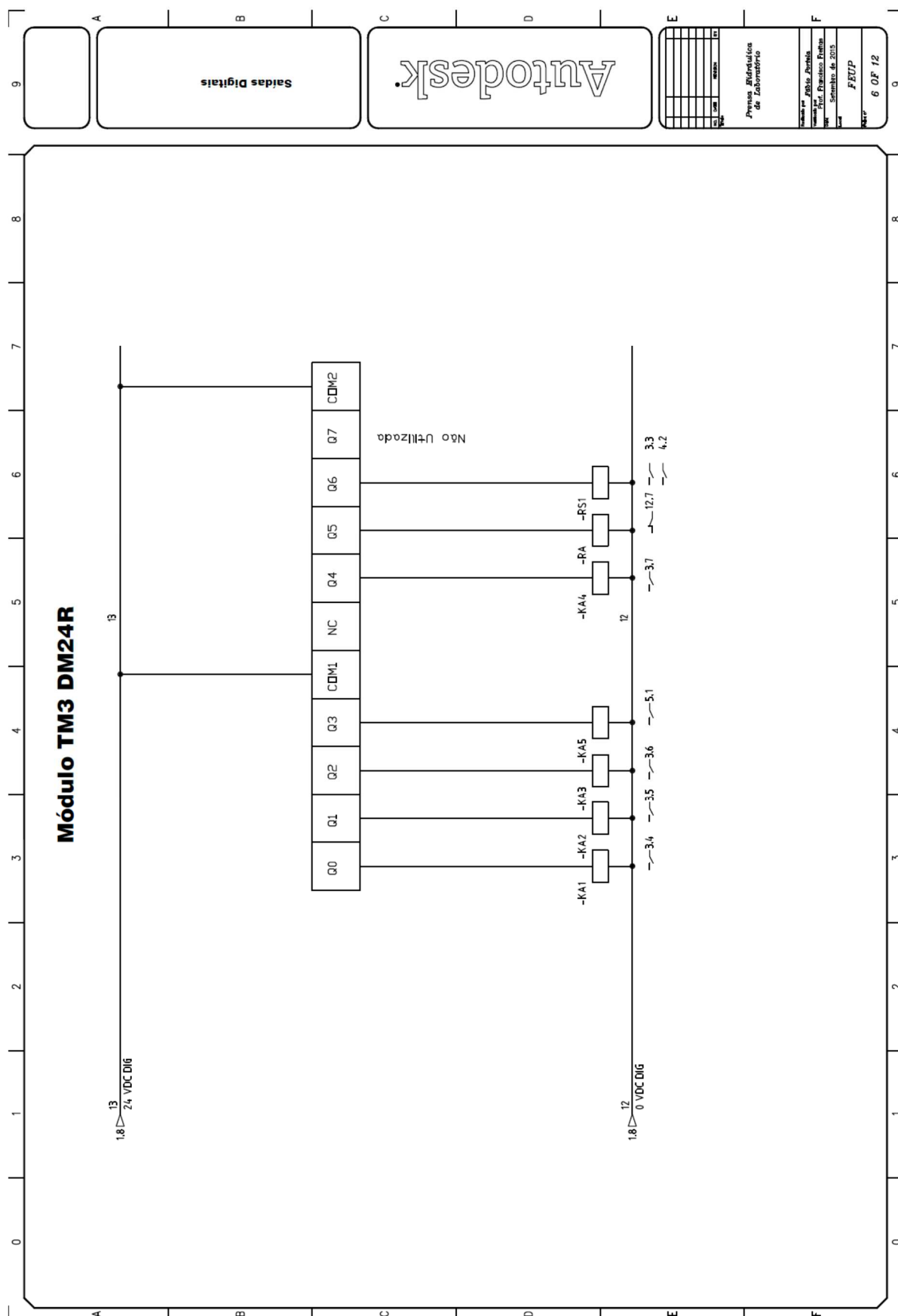


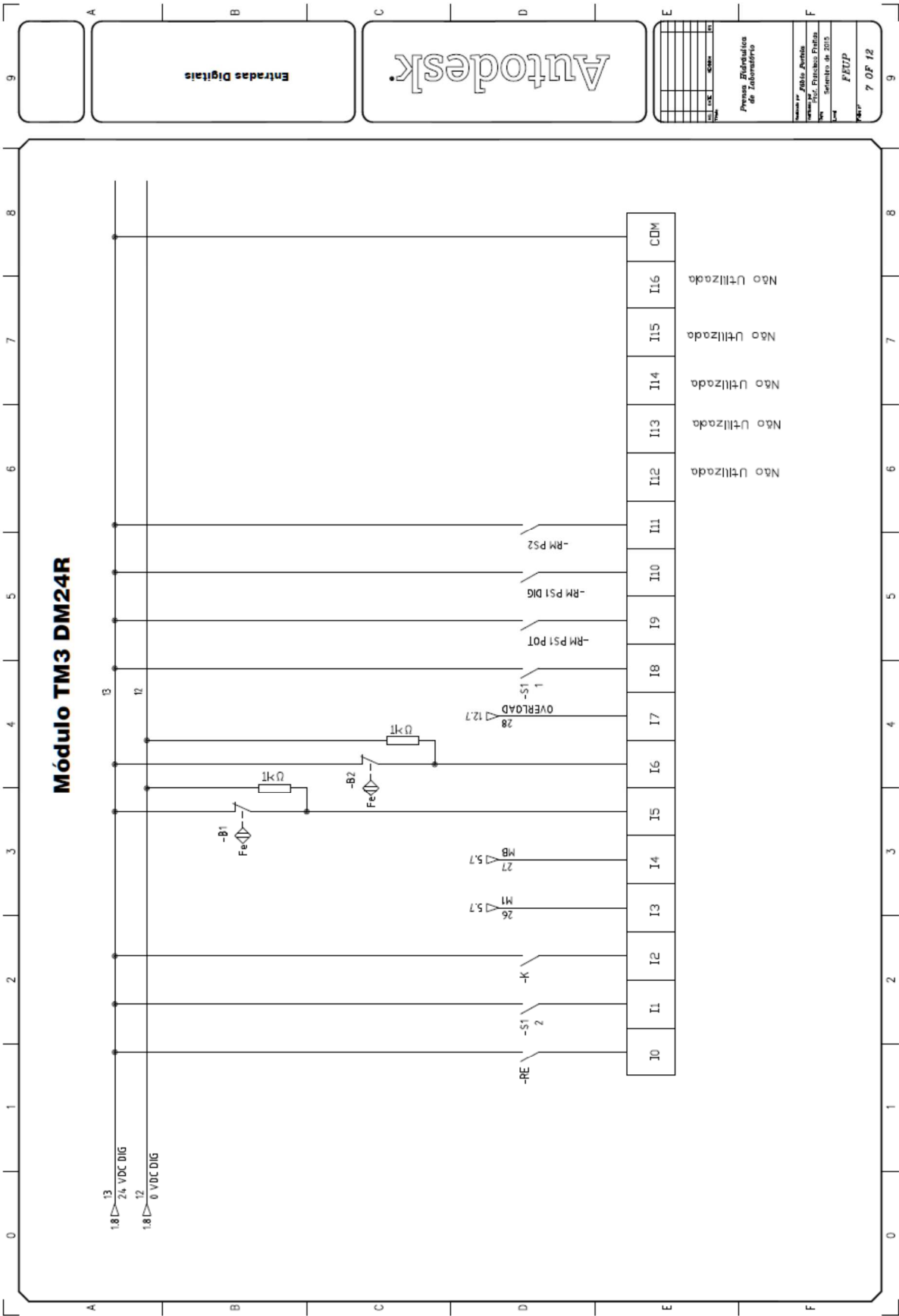


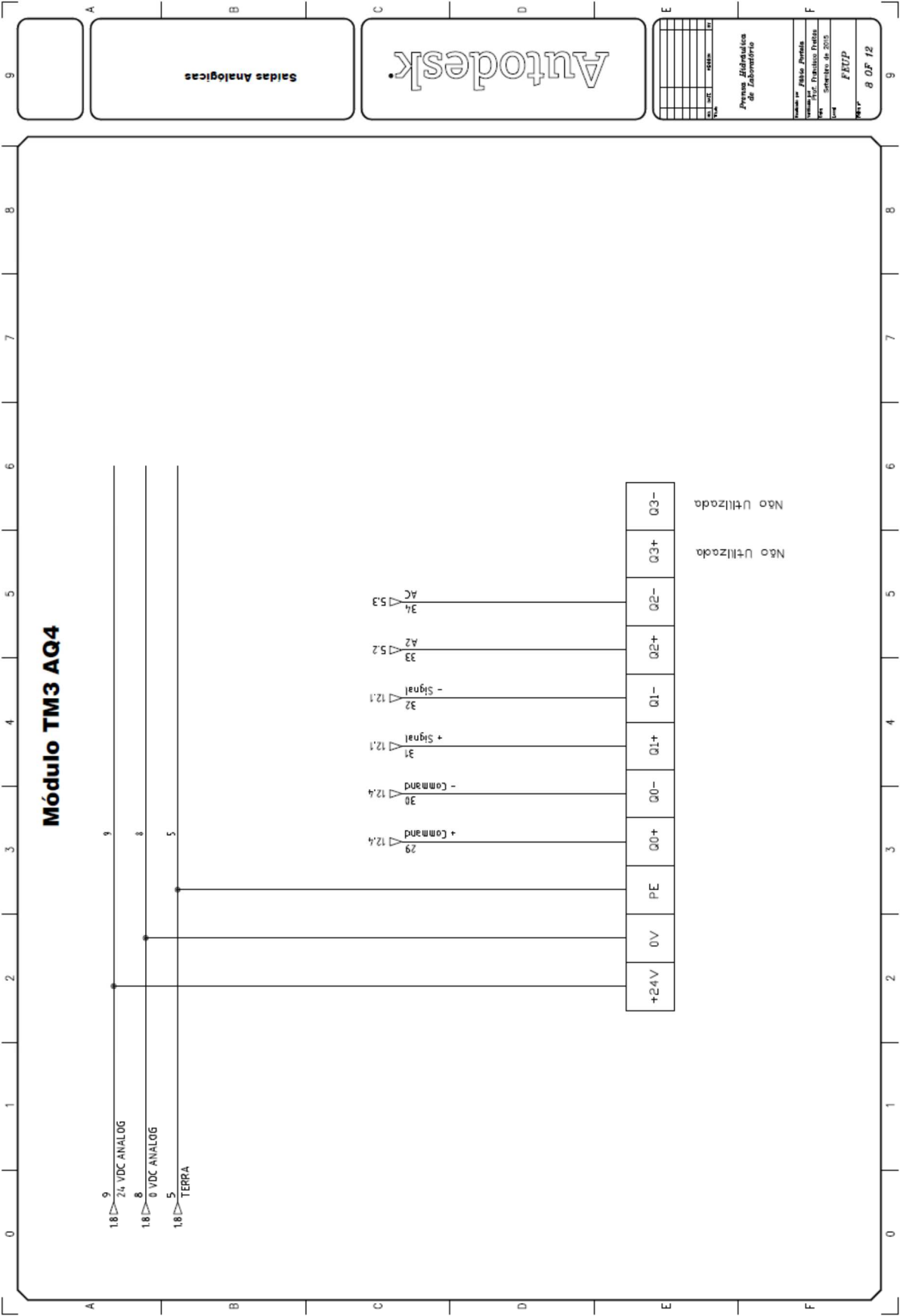


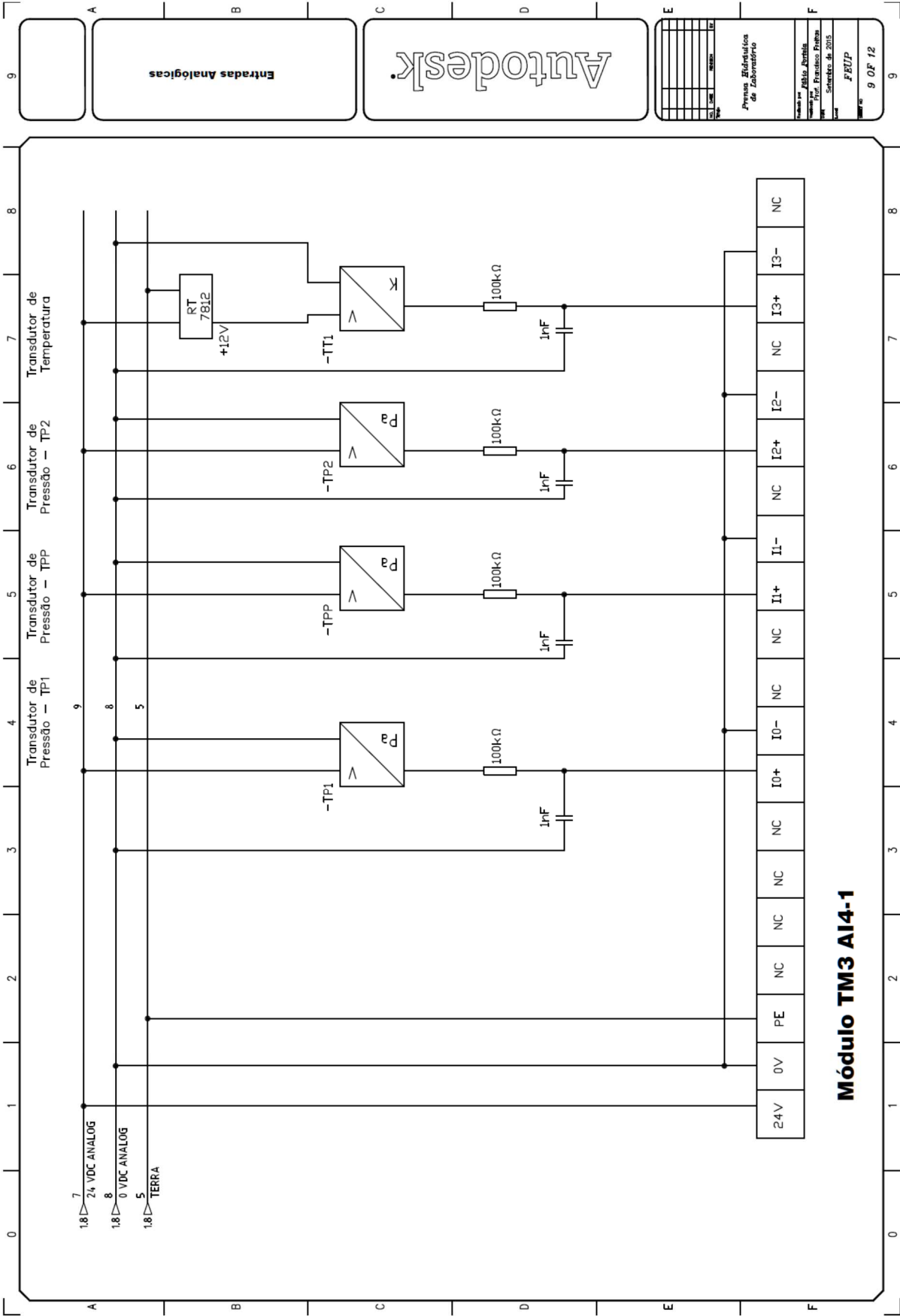


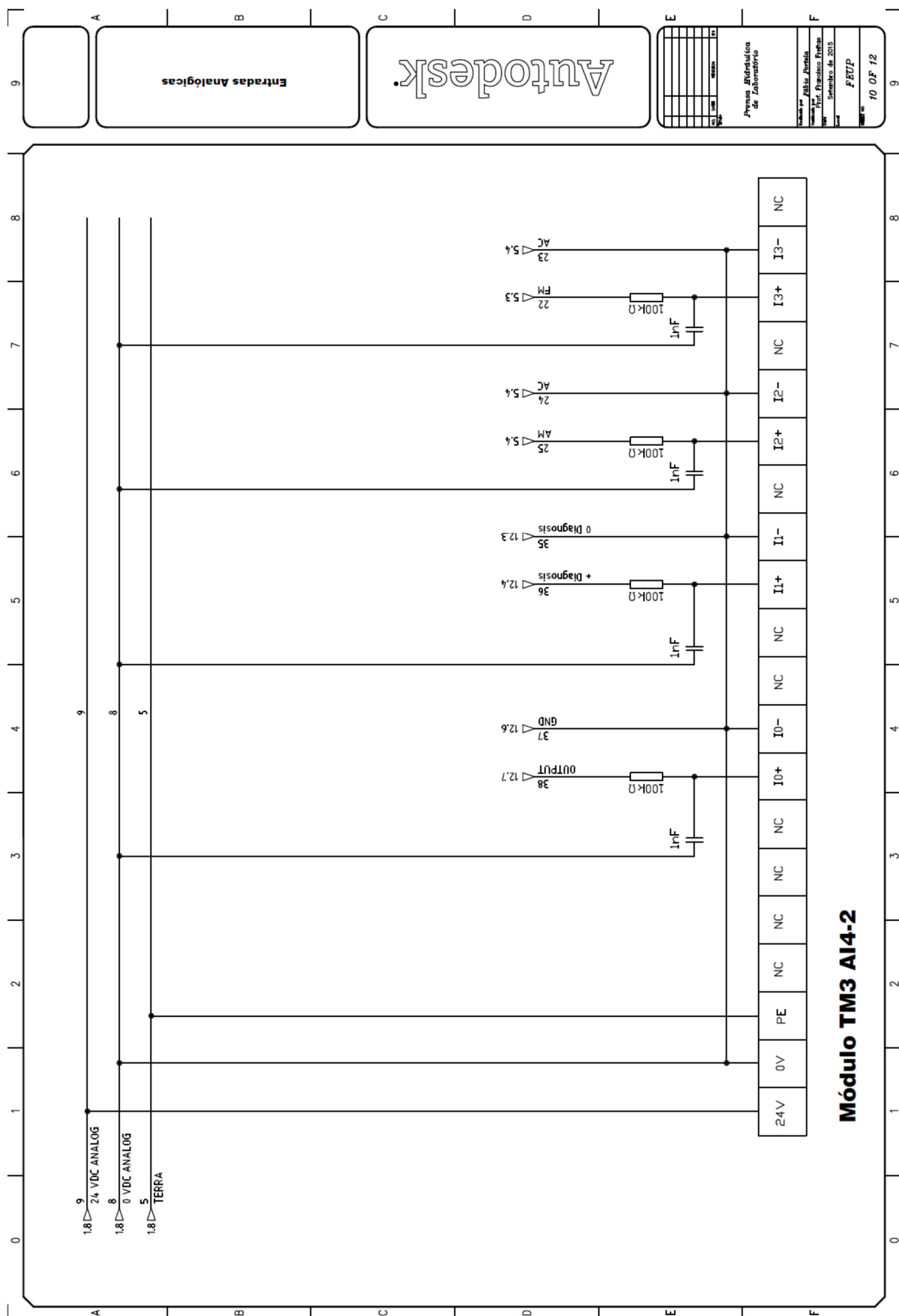


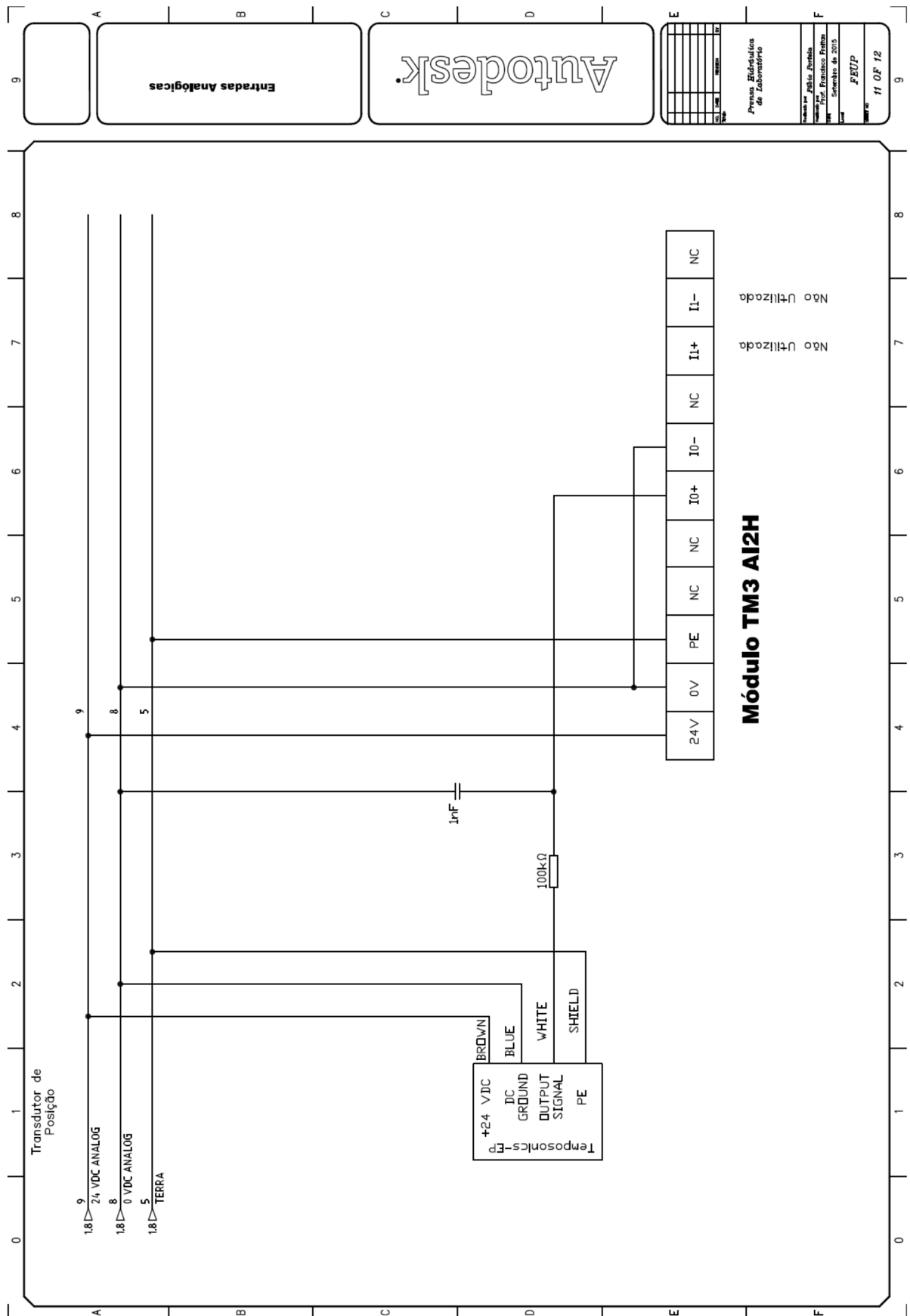


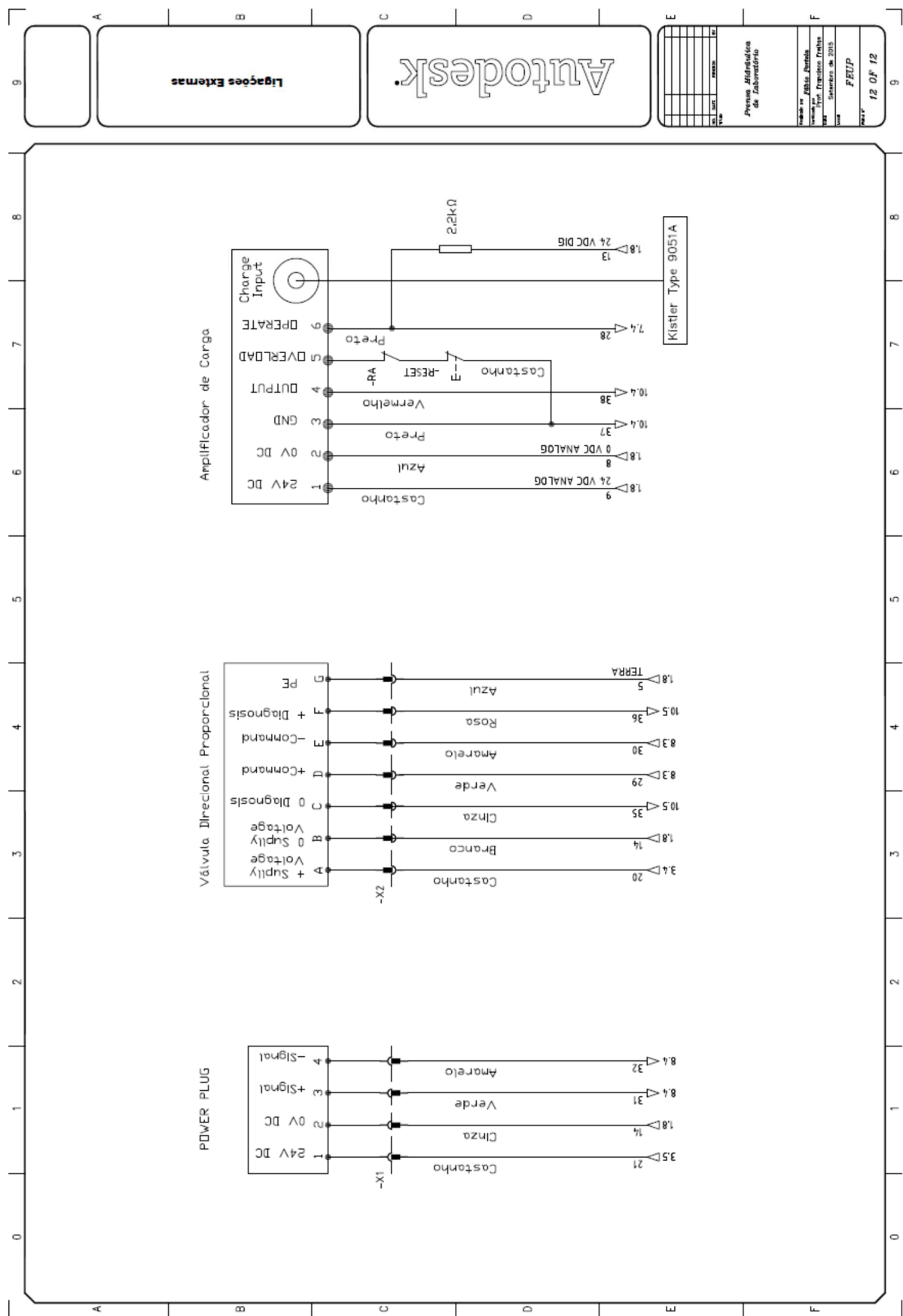












Identificação de Componentes

Prensa

| Designação | Componente/Função |
|------------|--|
| - | Válvula Direcional Proporcional |
| - | Válvula Limitadora de Pressão Proporcional |
| -B1 | Fim de Curso Superior |
| -B2 | Fim de Curso Inferior |
| -TP1 | Transdutor de Pressão 1 |
| -TP2 | Transdutor de Pressão 2 |
| -TPP | Transdutor de Pressão 3 |
| -TT1 | Transdutor de Temperatura |
| - | Célula de Carga |
| - | Transdutor de Posição |

Central Hidráulica

| Designação | Componente/Função |
|------------|-------------------------|
| -M | Motor Elétrico |
| - | Variador de Frequência |
| -QM1 | Válvula de Refrigeração |

Quadro Elétrico - Geral

| Designação | Componente/Função |
|-------------|---|
| -IG1 | Interruptor geral |
| -Q1 | Interruptor diferencial |
| -QF1 | Disjuntor 10A |
| -QF2 | Disjuntor 1A |
| -QF3 | Disjuntor 2A |
| -PS1 | Fonte de potência (24V/5A) |
| -PS2 | Fonte de sinal (24V/2A) |
| M251 MESC | Autômato programável |
| -RM PS2 | Relé para monitorização da fonte de sinal – Parte Analógica |
| -RM PS1 DIG | Relé para monitorização da fonte de potência – Parte Digital |
| -RM PS1 POT | Relé para monitorização da fonte de potência – Parte Potência |
| -SF1 | Botoneira de emergência |
| -RE | Relé de emergência |
| -RS1 | Relé de segurança |
| -KA1 | Relé para alimentação da válvula direcional proporcional |
| -KA2 | Relé para alimentação da válvula limitadora de pressão proporcional |
| -KA3 | Relé para o comando do variador de frequência – Comando Interno |
| -KA4 | Relé para alimentação da válvula de refrigeração |
| -KA5 | Relé para o comando do motor elétrico – Comando Interno |

Quadro Elétrico – Variador de Frequência

| Designação | Componente |
|-------------------|---|
| -F | Fusíveis 25A |
| -K | Contactador |
| -RT | Relé térmico |
| -T1 | Transformador 220VAC – 24VAC |
| -R1 | Relé para o comando do variador de frequência – Comando Interno |
| -R2 | Relé para o comando do potenciômetro – Comando Externo |
| -R3 | Relé para o comando do motor elétrico – Comando Externo |
| -S2 | Botoneira rotativa para comando do variador de frequência – Comando Externo |
| -START | Botoneira mono estável para o comando do motor elétrico – Comando Externo |
| -STOP | Botoneira mono estável para o comando do motor elétrico – Comando Externo |
| -P1 | Potenciômetro para comando da velocidade do motor elétrico |

Quadro Elétrico - Instrumentação

| Designação | Componente |
|-------------------|--|
| HMI STU 855 | Interface homem/máquina |
| -S1 | Seletor de três posições para seleção do modo de comando da fonte de energia – Comando Externo e Comando Interno |
| -RA | Relé para comando do “reset” ao amplificador |
| -RESET | Botoneira mono estável para “reset” ao amplificador |
| - | Amplificador de Carga |